

Wind Profiler를 이용한 울산공항 지형풍 연구

이민구, 김한준, 고수완, 강경아, 윤기완
울산공항기상대

1. 서론

울산공항은 형산강지구대에 남북방향으로 위치하여 지형에 의한 바람의 영향을 많이 받고 있어 「울산공항 동풍과 주변지형과의 상관관계 고찰」(2005. 11)로 동쪽지형과의 풍향관계를 조사하였다. 2005년 「울산공항 회항에 따른 바람유형별 원인분석」 현장연구 과제에서 2002~2005년에 항공기회항(20회), 실패접근(88회)이 발생한 원인별로 보면 시어에 의한 비율이 68%로 나타났다. 공항주위에 나타나는 이런 기상현상에 대비하고 항공기 안전운항을 위하여 2005년 울산공항은 Wind Profiler를 양 활주로 끝단에 각각 설치하여 운영 중에 있다.(2006. 5. 15)

기압계 풍계와 상이하게 나타나는 울산공항 풍계는 주변지형에 의해 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있는데, 성층 안정대기 조건에서 낮과 밤에 뚜렷한 풍계변화(남풍 및 북풍)가 나타나는 날의 Wind Profiler의 자료를 활용하여 울산공항에 국지적으로 나타나는 연직 바람의 특성을 분석하고자 한다. 이를 통해 항공기 이착륙 및 운항안전에 기여하고자 한다.

2. 자료조사

2.1. 기간 및 자료

조사기간 : 2006. 1. 1. ~ 2006. 09. 30 (9개월간)

조사자료 : METAR와 AMOS 자료

R36(활주로남쪽), R18(활주로북단) Wind Profiler Daily Statistical Table (2006.1.1~9.30)

-150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200ft 풍향·풍속 ; 기본자료(1차 자료)

-1500, 2100, 2550, 3000, 3450, 4050, 4500, 5100ft 풍향·풍속 ; 지형고도 자료(2차 자료)

2.2. 공항주변 산 높이

동쪽 - 무룡산 1478ft, 동대산 1456ft

남쪽 - 돛길산 293ft, 함월산 658ft

북쪽 - 순금산 388ft, 치술령 2611ft

서쪽 - 운제산 1581ft, 문수산 1968ft, 고현산 3385ft, 신불산 3963ft, 가지산 4068ft,
접근레이더 499ft

MSA(Minimum sector altitude, 최저구역고도) - 5100ft

2.3. 용어정의

2.3.1 해륙풍(land and see breeze)

낮과 밤에 풍향이 바뀌는 국지바람의 일종이다. 낮에는 바다나 호수에서 육지로 불고, 밤에는 육지에서 바다나 호수 쪽으로 육풍이 분다. 수면과 지면의 열용량의 차이 및 열 전달방법이 다르기 때문에 낮에는 같은 위도의 수면보다 지면의 공기가 더 빨리 가열되므로 밀도차가 심해져서 기압경도가 형성되므로 국지적 순환을 형성하게 된다. 해륙간의 온도차는 낮이 밤보다 크므로 해풍이 육풍보다 강한 것이 보통이다. 해풍은 5~6m/s 정도이고, 육풍은 2~3m/s 정도이다. 연직방향으로는 지상에서 약 1km 전후이다.

2.3.2 산곡풍(mountain and valley wind)

산악지대에 나타나는 국지바람형태의 일종으로서 낮에는 골짜기 아래에서 산등성이를 향하여 골바람이 불고, 밤에는 산등성이에서 골짜기를 향하여 산바람이 분다. 골바람은 낮에 산의 경사면 및 골짜기가 태양에 의하여 데워져 거기에 접한 공기도 가벼워지면서 상승하기 때문에 일어난다. 산바람은 밤에 산의 경사면 및 골짜기의 대기가 복사냉각으로 무거워져서 낮은 쪽으로 흘러내리기 때문에 일어나는 일종의 중력풍이다.

2.3.3 중력풍(gravity wind)

사면이 있는 곳의 공기의 밀도가 사면으로부터 조금 떨어진 같은 높이의 공기 밀도보다 커져 그 무게에 의하여 사면을 붙어내리는 바람을 말한다.

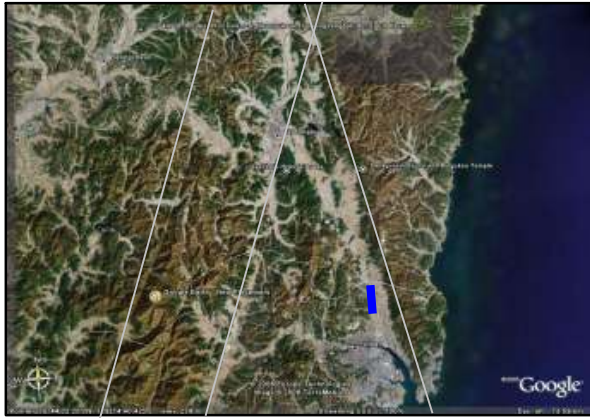
대기가 안정성층을 이룰 때 내부중력과는 연직방향의 밀도류와 복원력에 의한 부력에 의해 부력진동을 하게 된다. 연직방향으로 전파되는 파동의 위상은 고도에 따라 변하며, 이런 진동의 결과로 수평으로 전파된다.

3. 지상 바람과 Wind Profiler 바람 분석

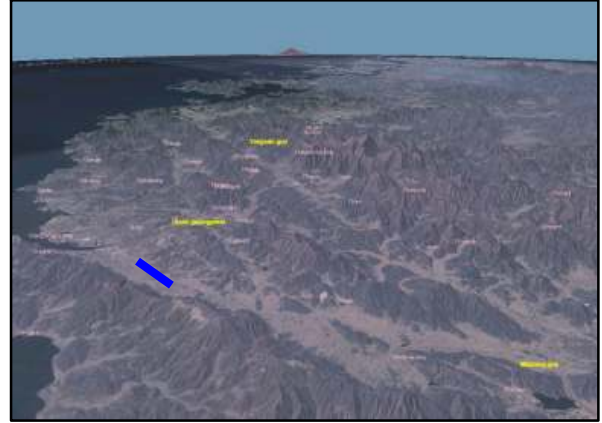
3.1. 지형분석

아래의 그림 1, 2에서 울산서쪽의 지형은 약 20-200°방향으로 1000m 이상의 고봉들이 연이어 있으며 그 사이의 골들은 남해안까지 뻗어있으며, 고속도로 및 국도가 놓여져 있다. 울산동쪽은 단일 능선들이 340-160°방향으로 위치하여 있어 내륙과 동해를 구분하고

있다. 남쪽으로는 서쪽산간지대에서 발원하여 동진으로 흐르는 태화강이 울산만으로 이어져 있어 강 이남에는 평지로 울산도심과 공업단지가 자리하고 있다. 북쪽으로 가면 울산 이화와 경주 모화에서는 호리병모양(α)으로 폭이 약 800m로 좁아지기는 하나 포항까지 이어지는 형산강지구대를 이루고 있다.

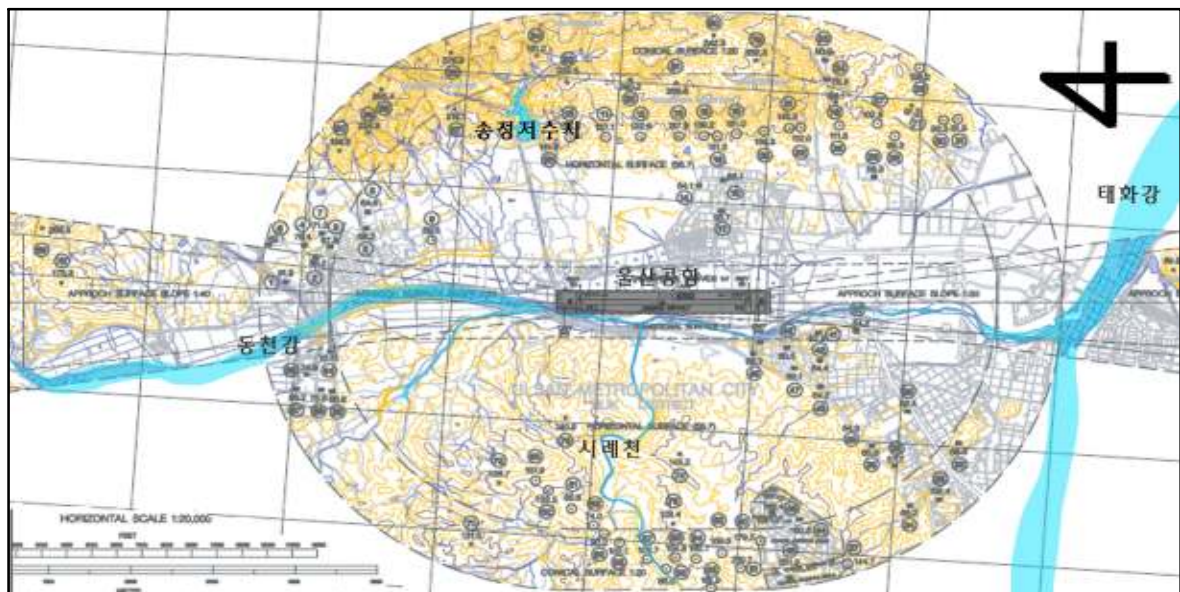


[그림 1] 위에서 본 울산부근 지형 (Google earth)



[그림 2] 북동에서 본 울산부근 지형 (NASA world wind)

그림 3에서 공항주변을 살펴보면 동쪽은 450m산(약 1500ft)들이 연이어 능선을 이루는 사이의 협곡을 막아 송정 저수지가 있으며 배수로가 활주로 북단과 경계로 동천강과 합수한다. 서쪽에는 100m(약 300ft)의 낮은 구릉이 접하고 활주로를 따라 평행하게 동천강이 흐르고 활주로 중앙부분에서는 서쪽 구릉사이로 시례천이 동천강과 합천하고 있다.



[그림 3] 울산공항 주변 지형도(AIP AD AERODROME OBSTACLE CHART B 편집)

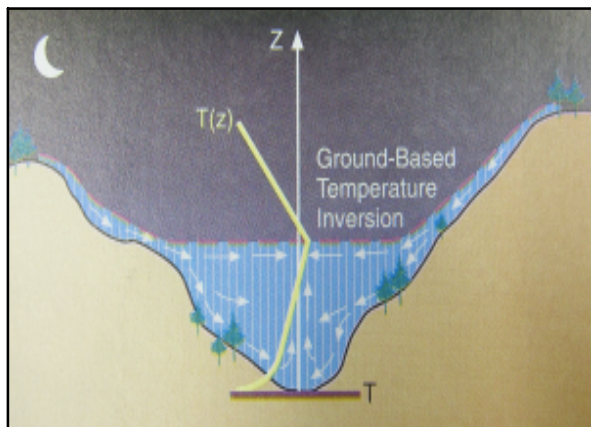
3.2 지형에 따른 바람분석

3.2.1 풍계 분류

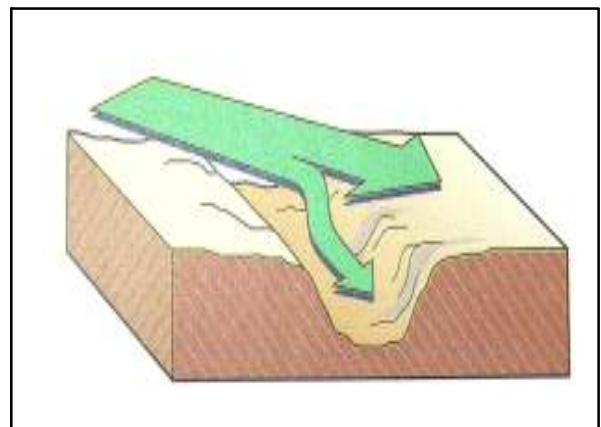
울산공항에서 바다에서 들어오는 풍향은 동해안의 북동기류에서 들어오는 북동~동류가 있고 울산만을 통해 들어오는 남동~남서풍이 나타날 수 있다. 북동~동풍류는 「울산공항 동풍과 주변지형과의 상관관계 고찰」에서 연구되어 기압계풍이 동쪽지형에 의한 변형되는 풍계로 분류되었기에 울산공항의 남쪽에서 들어오는 풍계(140~230°)를 해풍으로 보고 조사 하였다.

울산공항의 북풍의 방위각을 알기 위하여 15kt이상 부는 날의 풍계를 조사하여 지형효과에 의해 발생하는 북풍의 범위는 340~10°로 나타났다.

3.2.2 지형에 따른 풍계분석



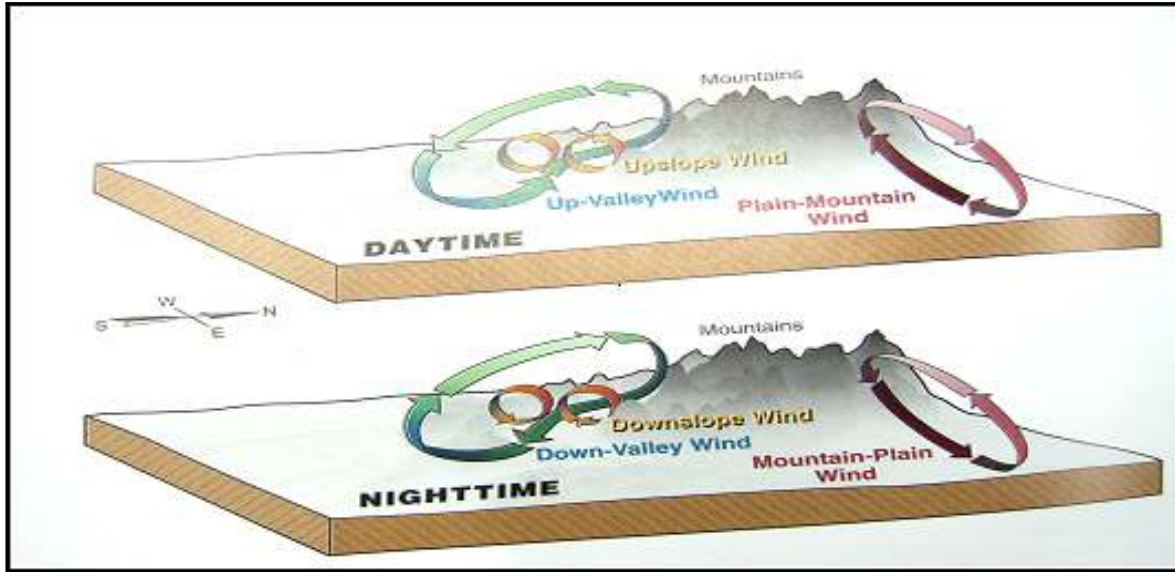
[그림 4] 산풍에 의한 하강류 모식도



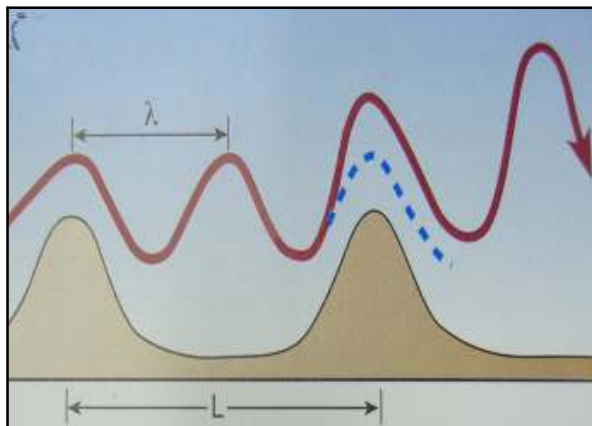
[그림 5] 지형에 변형된 하강류

일출 후에는 골보다는 동쪽에 면한 산사면 정상 부근부터 부분적으로 가열되어 산 정상 을 향하여 활승풍(Upslope wind)이 나타나고 시간이 지남에 따라 시작지점이 산 아래인 골에서부터 활승풍이 강화되면 평지나 바다로부터 골을 향하여 곡풍(Up-valley wind)이 진행된다. 한 낮에는 태양의 고도각(Altitude angle)이 커지면서 산사면의 복사열이 증가 하여 산과 내륙에서 복사가 강화되어 바다에서 해풍이 불기 시작하게 된다. 오후 늦게는 일조량은 감소되지만 동쪽사면 보다는 서쪽 산사면의 복사가 강화되어 해풍이 약해지 는데 축적된 복사열로 인하여 해풍의 세기와 지속시간이 결정된다.

울산공항 주변은 양면이 산사면인 골에 위치하여 일몰 이후부터 일출 전까지 골의 사면 을 따라 복사냉각이 되면 밀도류인 활강풍(Downslope wind)에 의해 산풍(Mountain breeze)이 분다. 주변의 산들이 높지 않아 사면에서 내려온 밀도류는 지형의 굴곡인 계곡 및 배수로를 따라 골의 중앙에 모이게 되고 계곡의 높이만큼의 역전층(Nocturnal inversion)이 형성된다. 남북으로 놓인 골 때문에 계곡이 열리는 곳으로 바람 (Down-valley wind)을 유도하게 되는데, 시례천 계곡, 저수지 배수로 등의 상대적 저지



[그림 6] 산 사면과 골, 산과 평야간의 산곡풍의 흐름을 나타낸 모식도



[그림 7] 중력과 진행 모식도



[그림 8] 실지형에서 중력과 예측도

대를 통해 가장 낮은 곳인 동천강 주변으로 활강한 다음 지형 경사도에 의해 울산만을 향하여 북풍이 불게 되는데 산사면 풍이 일시적으로 강할 때는 합성풍에 의해 320~040°의 풍향이 나타나기도 한다. 풍하 측으로 갈수록 골짜기 폭이 넓어지므로 침강역전층의 두께가 두꺼워지거나 풍속이 증가하기는 어렵다.

울산공항은 서쪽의 산들에 의한 지형의 배열각(20 → 200°)에 의해 서풍류 (약 300°)강화 될 수 있으나 양쪽의 산사면과 바다가 가까워 산곡풍과 해륙풍이 우세하여 서풍류가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그러나 일출, 일몰 전후나 해륙풍이 바뀌는 시점에 서풍계열이 전이풍으로 잠시 나타나는 데, 이는 중력과의 전파에 의한 풍계로 보여 진다.

위와 같이 중력파와 해륙풍 그리고 산곡풍 등이 복합적으로 나타나는데 오후 늦게나 밤

그리고 새벽에 나타나는 북풍을 지형파(Terrain wind)라고 하고 낮에 바다에서 내륙으로 부는 바람은 해풍이라 하여 연구를 진행하고자 한다.

3.3 지상자료 분석

3.3.1 남풍과 북풍이 동시에 나타난 경우

<표 1-1> 남풍과 북풍이 동시에 나타난 날 단위 : 시간 : KST, 풍향 : deg.

| 월 | 일 | 전이풍시간 | | 남풍시간 | | 전이풍시간 | | 북풍시간 | | 비고 |
|---|----|---------|----|------|----|---------|----|------|-------|--------|
| | | 풍향 | 시작 | 시작 | 종료 | 풍향 | 종료 | 시작 | 종료 | |
| 1 | 8 | - | - | 16 | 17 | - | - | 18 | 익일 4 | 고기압 |
| | 11 | 50 | 15 | 16 | 17 | - | - | 18 | 익일 12 | 고기압 |
| | 23 | - | - | 15 | 17 | 260,30 | 19 | 20 | 21 | 고기압 |
| | 28 | - | - | 16 | 18 | 310 | 19 | 20 | 익일 6 | 고기압 후면 |
| | 29 | - | - | 12 | 19 | - | - | 19 | 익일 6 | 안장부 |
| 2 | 19 | - | - | 14 | 19 | - | - | 19 | 익일 8 | 동서고기압대 |
| | 20 | - | - | 14 | 18 | 300 | 19 | 20 | 익일 10 | " |
| 3 | 17 | 90 | 12 | 13 | 20 | 300 | 21 | 22 | 익일 5 | 남고북저 |
| | 31 | 30 | 8 | 10 | 24 | - | - | 24 | 익일 8 | " |
| 4 | 21 | - | - | 13 | 20 | - | - | 21 | 익일 8 | 서고동저 |
| | 22 | 30 | 14 | 15 | 20 | 330 | 21 | 22 | 익일 3 | 안장부 |
| | 25 | - | - | 11 | 21 | 330 | 22 | 23 | 익일 6 | 서 고기압 |
| | 28 | - | - | 10 | 21 | 260 | 22 | 23 | 24 | " |
| | 29 | - | - | 8 | 15 | 240~310 | 21 | 22 | 익일 4 | 북 저기압 |
| 5 | 14 | 320 | 15 | 17 | 19 | 100,320 | 21 | 22 | 익일 9 | 남 고기압 |
| | 15 | 300 | 12 | 13 | 20 | - | - | 21 | 익일 6 | " |
| | 17 | 100 | 11 | 12 | 20 | - | - | 21 | 익일 8 | 고기압 |
| | 20 | 30 | 12 | 13 | 19 | 290 | 20 | 21 | 익일 9 | 동저서고 |
| | 21 | - | - | 10 | 19 | 320 | 20 | 22 | 23 | 동고서저 |
| | 23 | 330 | 14 | 15 | 20 | 320 | 21 | 24 | 익일 9 | 안장부 |
| | 31 | 90, 360 | 9 | 12 | 20 | 330 | 21 | 23 | 익일 8 | 고기압 |
| 6 | 9 | - | - | 12 | 20 | 330 | 21 | 23 | 익일 7 | 북저남고 |
| | 16 | 330~60 | 8 | 12 | 18 | 320 | 20 | 21 | 익일 9 | 고기압 |
| | 17 | 50 | 10 | 11 | 22 | - | - | 23 | 익일 4 | " |
| | 19 | 30 | 11 | 13 | 20 | - | - | 21 | 익일 7 | 고기압 |
| | 20 | 360~70 | 9 | 13 | 21 | 290 | 23 | 24 | 익일 5 | mT 연변 |
| 7 | 21 | - | - | 10 | 19 | 120 | 20 | 21 | 익일 2 | cT 연변 |
| | 24 | 260 | 12 | 16 | 21 | - | - | 22 | 익일 9 | " |
| | 25 | 30 | 10 | 11 | 20 | - | - | 21 | 익일 1 | 동해 고기압 |

<표1-2> 남풍과 북풍이 동시에 나타난 날 단위 : 시간 : KST, 풍향 : deg.

| 월 | 일 | 전이풍시간 | | 남풍시간 | | 전이풍시간 | | 북풍시간 | | 비고 |
|---|----|--------|----|------|----|-------|----|------|-------|---------|
| | | 풍향 | 시작 | 시작 | 종료 | 풍향 | 종료 | 시작 | 종료 | |
| 8 | 2 | 50 | 9 | 10 | 20 | 260 | 21 | 22 | 익일 7 | mT 연변 |
| | 3 | 330~30 | 8 | 13 | 20 | - | - | 21 | 익일 8 | " |
| | 4 | 50,120 | 9 | 11 | 19 | - | - | 20 | 익일 8 | " |
| | 5 | 90 | 9 | 11 | 19 | 130 | 21 | 22 | 익일 8 | " |
| | 6 | 40~120 | 9 | 12 | 19 | - | - | 20 | 익일 11 | " |
| | 7 | 60 | 12 | 13 | 20 | - | - | 21 | 익일 9 | " |
| | 10 | 30,110 | 8 | 12 | 19 | - | - | 20 | 익일 7 | " |
| | 12 | - | - | 14 | 19 | 240 | 20 | 21 | 23 | 남 고기압 |
| | 14 | 40 | 9 | 10 | 20 | 320 | 21 | 22 | 24 | mT 연변 |
| 9 | 19 | 310 | 15 | 16 | 19 | 330 | 20 | 21 | 익일 10 | 북고기압 연변 |
| | 28 | 40 | 10 | 11 | 18 | 330 | 19 | 20 | 익일 7 | 남고기압 |

일기도 분석에 의하면 기압계가 확장하거나 진행전면에 들어 경도력이 큰 기압계 풍을 제외하면 고기압권이나 안장부에서 낮과 밤에 남풍 및 북풍이 나타나 표1-1에 의해 조사 분류하였다. 남풍의 영향을 받는 시간은 겨울철에 오후(평균 14KST)에 시작하고, 여름철에는 10KST 전후에 시작된다. 북풍이 바뀌는 시각은 겨울철에는 일몰 후 급격히 시작되나 여름철에는 복사열이 잔존하여 일몰 후에 상당한 시간을 두고 풍계가 바뀌는데 mT가 장자리에 들은 경우는 21KST를 넘어도 바뀌지 않는 경우를 볼 수 있다. 오전의 전이풍 발생 시간을 살펴보면 여름에는 8KST 전후, 겨울철에는 12KST 후에 나타나고, 오후의 전이풍은 겨울철에는 18KST 전후, 여름철에는 20KST 전후로 북풍이 불어 오전의 시간차가 오후보다 크게 나타나고 있다. 오전에 전이풍은 북동류가 나타나고 있음은 동쪽에 면한 골의 사면(동사면)이 먼저 가열되어 서사면에서 계곡을 가로 지르는 풍계(Cross-valley wind)가 주로 나타나고 오후에는 반대로 동사면에서 서쪽에 면한 골짜기의 사면(서사면)으로 풍향과 중력과의 합성풍으로 발생하여 서풍계열이 우세하게 나타남을 볼 수 있다.

3.3.2 북풍만 나타나는 경우

<표 2> 일몰 후 북풍이 나타나는 일수

| 월 | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| 누적일 | 16일 | 14일 | 22일 | 19일 | 13일 | 11일 | 5일 | 14일 | 17일 |

중관풍과 달리 일몰 후에 바로 지역풍인 북풍이 나타는 경우로 표1-2에 의하면 6월과 7월을 제외하고는 15일이상이 일몰 후 나타나고 있으면 남풍과 함께 발생한 날과 합산하면 평균 20일 이상이 나타남을 알 수 있다. 겨울철이 여름철보다 발생일이 많음은 서쪽의 고봉군들에 의해 기압계 바람을 차단하여 고유의 지형풍이 나타나기 때문이다.

3.4 Wind Profiler 자료분석

3.4.1 월별 기본고도별 풍속통계자료

<표 3> R36 월별 기본고도별 풍속통계자료

단위 : 10ft, kt

| 고도 | AMOS | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | |
|----|------|-----|-----|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1월 | 평균 | 7.0 | 5.3 | 4.5 | 4.4 | 5.4 | 5.8 | 6.0 | 6.1 | 6.1 |
| | Max | 19 | 22 | 32 | 29 | 29 | 22 | 24 | 27 | 27 |
| 2월 | 평균 | 7.5 | 6.4 | 5.7 | 5.9 | 6.9 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.1 |
| | Max | 31 | 20 | 29 | 27 | 28 | 28 | 27 | 25 | 25 |
| 3월 | 평균 | 5.2 | 4.0 | 4.0 | 4.5 | 5.2 | 5.6 | 5.9 | 6.1 | 6.2 |
| | Max | 22 | 30 | 39 | 48 | 42 | 38 | 39 | 38 | 38 |
| 4월 | 평균 | 7.6 | 5.8 | 6.5 | 7.2 | 8.0 | 8.7 | 9.1 | 9.7 | 10.4 |
| | Max | 24 | 33 | 42 | 37 | 39 | 41 | 39 | 41 | 44 |
| 5월 | 평균 | 6.6 | 6.0 | 6.9 | 7.7 | 8.4 | 8.8 | 9.3 | 9.8 | 10.3 |
| | Max | 19 | 30 | 36 | 33 | 37 | 34 | 34 | 36 | 36 |
| 6월 | 평균 | 5.4 | 4.9 | 5.9 | 5.8 | 6.1 | 6.5 | 6.7 | 7.1 | 7.6 |
| | Max | 18 | 36 | 36 | 36 | 37 | 36 | 37 | 39 | 40 |
| 7월 | 평균 | 4.7 | 6.4 | 7.9 | 7.6 | 7.9 | 8.3 | 8.7 | 9.2 | 9.8 |
| | Max | 28 | 48 | 57 | 63 | 64 | 66 | 69 | 73 | 72 |
| 8월 | 평균 | 5.7 | 5.3 | 7.2 | 6.9 | 7.1 | 7.3 | 7.4 | 7.6 | 7.9 |
| | Max | 27 | 35 | 83 | 55 | 43 | 43 | 45 | 46 | 50 |
| 9월 | 평균 | 7.0 | 7.8 | 9.3 | 10.2 | 10.8 | 10.9 | 11.0 | 11.1 | 11.4 |
| | Max | 37 | 49 | 54 | 55 | 54 | 56 | 60 | 62 | 63 |

<표 4> R18 월별 지형고도별 풍속통계자료

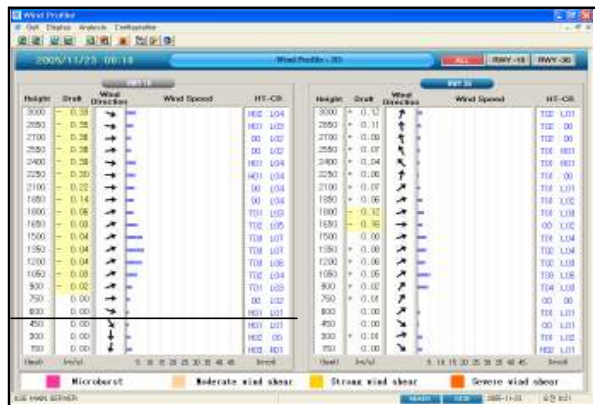
단위 : 10ft, kt

| 고도 | AMOS | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | |
|----|------|-----|-----|-----|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1월 | 평균 | 6.5 | 7.0 | 8.4 | 9.6 | 10.2 | 10.1 | 9.4 | 9.2 | 9.4 |
| | Max | 20 | 24 | 37 | 36 | 35 | 37 | 33 | 29 | 26 |
| 2월 | 평균 | 7.4 | 7.8 | 8.5 | 9.2 | 9.1 | 8.5 | 7.8 | 8.0 | 8.3 |
| | Max | 22 | 25 | 37 | 50 | 42 | 36 | 32 | 30 | 30 |
| 3월 | 평균 | 4.8 | 4.3 | 5.1 | 5.8 | 5.8 | 5.6 | 5.3 | 5.3 | 5.5 |
| | Max | 23 | 27 | 41 | 42 | 47 | 47 | 33 | 33 | 34 |
| 4월 | 평균 | 6.9 | 6.0 | 7.5 | 8.2 | 8.4 | 8.3 | 8.4 | 8.9 | 9.8 |
| | Max | 24 | 31 | 47 | 48 | 44 | 42 | 40 | 37 | 39 |
| 5월 | 평균 | 6.6 | 6.1 | 7.1 | 7.8 | 8.4 | 8.5 | 8.7 | 9.3 | 9.9 |
| | Max | 21 | 29 | 43 | 40 | 44 | 41 | 37 | 35 | 36 |
| 6월 | 평균 | 4.9 | 5.8 | 7.8 | 8.4 | 8.5 | 8.1 | 7.3 | 7.0 | 7.6 |
| | Max | 18 | 36 | 47 | 44 | 39 | 36 | 37 | 42 | 44 |
| 7월 | 평균 | 4.6 | 5.7 | 8.0 | 9.1 | 9.6 | 9.6 | 9.2 | 9.0 | 9.7 |
| | Max | 32 | 48 | 55 | 53 | 57 | 63 | 65 | 66 | 67 |
| 8월 | 평균 | 8.2 | 7.7 | 8.3 | 9.7 | 13.0 | 13.4 | 11.6 | 9.1 | 8.2 |
| | Max | 20 | 88 | 88 | 94 | 95 | 91 | 91 | 95 | 74 |
| 9월 | 평균 | 6.9 | 7.5 | 8.8 | 9.5 | 10.0 | 10.2 | 10.2 | 10.2 | 11.0 |
| | Max | 36 | 42 | 45 | 50 | 54 | 54 | 57 | 64 | 65 |

Wind Profiler의 월별풍속특성을 보면 겨울철에는 활주로 북쪽인 R18의 300~750ft에서 더 강하게 불었고 600ft에서는 월등하게 강함을 볼 수 있다. 그림 9와 10에서 보듯 복사 냉각에 이어 일출에 의해 산사면이 복사가 시작되기 전에 형성된 역전층고도와 일치하며 그림4의 모식도에 의한 풍계가 형성됨을 볼 수 있다. 지상과 상층의 풍속 차는 R36보다 R18에서 현저한 차이를 나타내고 있으며 9월은 450ft이상 상층에서 평균풍속이 다른 달보다 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. R18 750ft의 8월 평균풍속은 13.4kt로 가장 월등하고 Max도 80kt이상으로 강하게 나타나고 있는데 이는 태풍의 내습으로 인한 것으로 보인다.



[그림 9] 일출전후로 역전층 고도



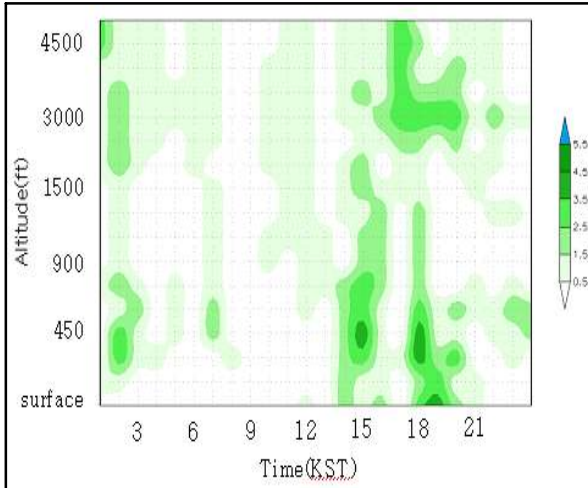
[그림 10] 역전층고도의 풍향변화

3월에는 150ft의 평균풍속이 지상보다 약하게 나타나고 있는데 계절이 바뀌면서 한기이류가 약하고 활강류가 강화된 것으로 판단된다. R18 4월 평균풍속은 450ft이상 상층은 서로 비슷한 약 8kt가 나타나나 그 이하 층에서는 감소가 뚜렷하게 나타나는 것은 지면 마찰에 의한 풍속 감소로 보인다.

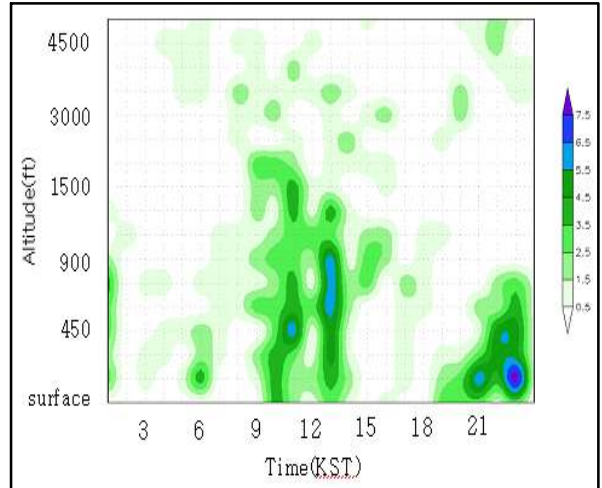
3.4.2 계절별 시간차 풍향 불연속 횟수에 대한 시계열 분석

표 1의 METAR 자료에서 남풍과 북풍이 나타나는 날의 R36Wind Profiler 자료의 고도별로 시간별 풍계 자료를 조사하였다. 전시간과 풍계가 90°이상 바뀌는 불연속 풍계면(이하 시간차 불연속이라 칭한다)에 대한 자료를 조사하여 해풍 및 지형풍 그리고 전이풍이 발생하는 시각 및 고도를 알아보고자 한다.

그림 11에서 겨울철에는 13KST가량 600ft 이상 고도층에서 변화가 나타나면서 지상에서 해풍으로 바뀌고 일몰직후인 18KST 무렵에는 북풍인 지형풍으로 바뀌는데 지상과 상층이 거의 같은 시간에 변화를 보인다. 북풍이 나타날 때는 300ft이상 고도에서 먼저 풍계가 변한다. 새벽 3KST 전에 150~900ft, 2100~3500ft에서 바람이 일시적으로 바뀌는 시간차 불연속면이 나타난 뒤, 7KST 전후에 450~750ft에서 약하게 다시 나타나는데 이는 전이풍의 출현이 상층에서 나타나서 12KST에는 지상과 600ft 이상 상층과 동시에 나타남을 알 수 있다.

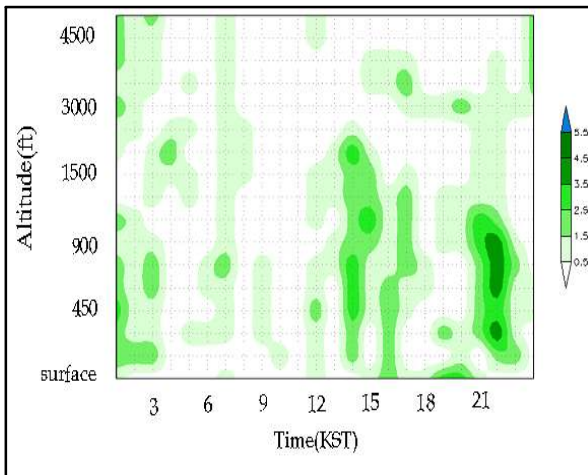


[그림 11] R36 겨울철 시간차 풍향 불연속 횡수 시계열도

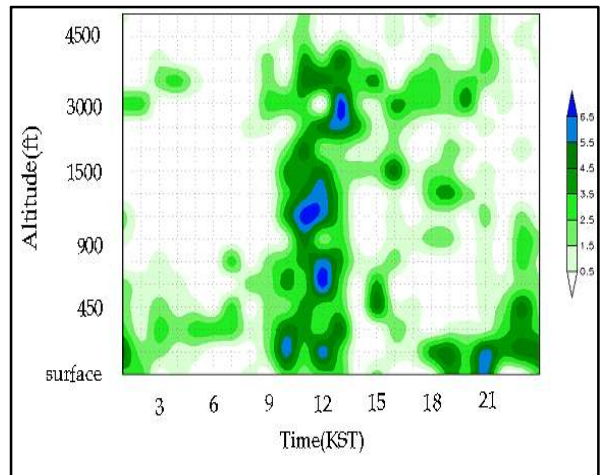


[그림 12] R36 여름철 시간차 풍향 불연속 횡수 시계열도

여름철인 그림 12에서 발생빈도도 높고 고도 및 시각의 윤곽선도 뚜렷하게 나타난다. 6KST 전후로 150ft 이상 상층에서 전이풍이 나타나고 9KST 이후에는 해풍이 나타난다. 2~15KST 사이에 나타나는 변화는 지상에서 해풍인 남풍이 진행할 때 300, 600, 900, 1500ft 각각의 층에서는 지상보다 앞선 시각에 변화가 발생하여 계층 풍계의 바뀌고 있고 750~1500ft 고도에서 규칙적인 시간차를 가지고 고도가 낮아져서 지상까지 연계되어 있다. 지상의 19KST는 전이풍이 발생하는 시간대라 중력파가 지상으로 약화되어 전파되었으며 약 21KST에는 지형풍인 북풍으로 변화한다. 22KST쯤에 나타나는 풍계변화는 mT 가장자리에서 영향을 받을 때, 대기의 복사열이 식지 않아 풍계변화가 다소 늦어지기 때문이다.



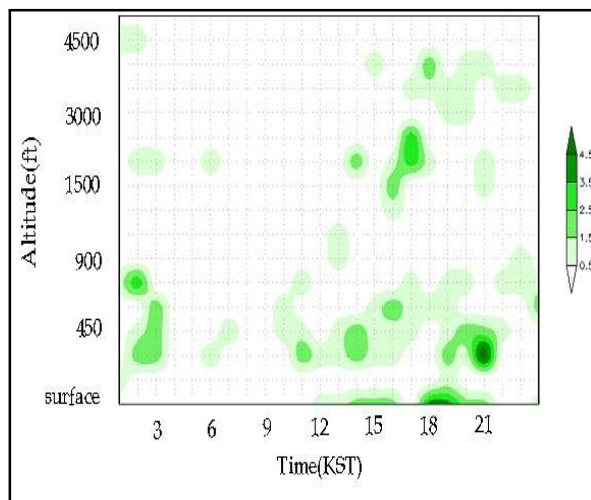
[그림 13] R18 겨울철 시간차 풍향 불연속 횡수 시계열도



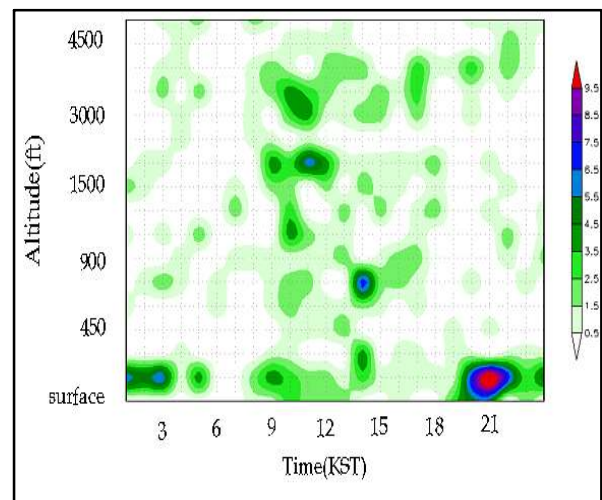
[그림 14] R18 여름철 시간차 풍향 불연속 횡수 시계열도

그림 13은 R18의 겨울철에 전시간과 풍향 불연속을 나타낸 것이다. 12KST에 지상에서 750ft까지 시간차 불연속은 6, 9KST의 상층 불연속이 시간이 지남에 따라 지상까지 전파 되는 것으로 750ft를 경계로 아래고도는 앞 시간의 불연속이 전파된 것이고 1000ft이상 고도층은 또 다른 계로 다음 14, 16KST 발생으로 이어진다. 14KST에는 지상을 제외하고 1,800ft까지 풍향변화가 나타나는 것은 16KST에 나타나는 형태와 비슷하고 점차 발생고도들이 낮아져 18KST에 지상과 300ft에서 지형풍인 북풍으로 풍계변화를 보인다. 20KST에는 역전층의 고도 위로 반전된 풍계가 커져이 형성되어 있는데 상층은 낮보다는 밤에 많은 풍계변화가 있음을 볼 수 있다. 형태가 분명하지는 않지만 북풍이나 남풍이 바뀌는 지상의 변화가 상층보다 앞선 시간에 발생하고 있음은 지상변화 후에 상층으로 전파되는 것을 볼 수 있다. 이는 지상의 지형의 높이와 역전층과 연관이 있고 상층으로 갈수록 시간차를 두며 발생횟수가 잦아드는 규칙성은 위상차에 의해 전해지는 중력파의 일부 모습이기도 하다. R18의 여름철(그림 14)에서는 새벽을 제외하고는 지상과 상층이 함께 발생하여 상층으로 갈수록 오랫동안 변화가 지속된다. 지상과 상층이 같은 시간에 변하지만 시간차 불연속이 나타나는 층은 R36(그림12)에서는 1500ft가 대부분이고 9KST에 최고고도에 도달하고 그 이후에는 고도도 낮아지면서 발생횟수도 급격히 감소하지만 R18의 3,000ft에서는 대기가 안정되는 21KST까지 지속됨을 보면 대류경계층(CBL; Convective Boundary Layer)이 서로 상이하게 형성되고 있어 R18에서는 급격히 내륙의 기상이 나타남을 알 수 있다. 밤에 형성되는 역전층의 고도도 R36에서는 150ft에 주를 이루고 점차 고도에 따라 증가하는 양상을 보이지만 R18에서 발생고도는 안정적으로 150ft를 유지하다 23KST경에는 450ft로 높아지고 있어 북쪽에서부터 역전층이 두터워지지만 남쪽에서는 그 모습이 뚜렷하지 않음을 알 수 있다.

3.4.3 계절별 고도차 풍향 불연속 횟수에 대한 시계열 분석



[그림 15] R36 겨울철 고도차 풍향 불연속 횟수 시계열도



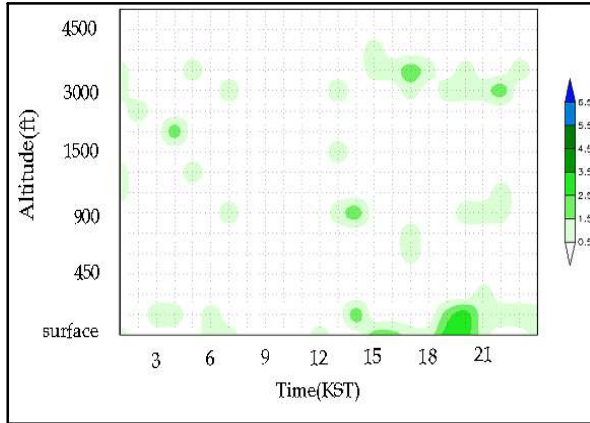
[그림 16] R36 여름철 고도차 풍향 불연속 횟수 시계열도

그림 15, 16, 17, 18은 계절별로 상하층간에 풍향 불연속(이하 고도차 불연속이라 칭한다.)을 나타내는 시계열도로 지형풍 및 남풍의 상층경계를 시간별로 어떻게 변화하는지 나타낸 것이며 상하층의 불연속에서 중력과 연직하강류와 부력의 관계를 찾으려고 한다.

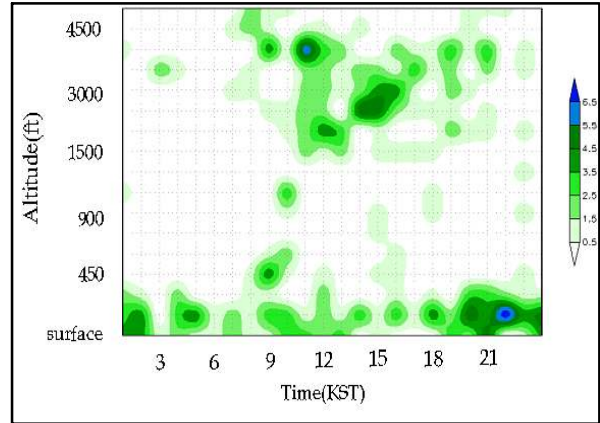
그림 15에서 해풍인 남풍으로 변하기 전에 전이풍이 발생하는데 겨울철은 고도차 불연속면이 여름철(150ft)보다 높은 300ft면에서 발생되어 600ft까지 높아졌다가 사라져서 10KST에 다시 나타나 11KST쯤 300ft에서 발생횟수가 증가하면 지상에서 1~2시간차를 두고 풍계 변화가 나타난다. 14KST 300~450ft에서 발생하는 것도 1~2시간차를 두고 지상에서 풍계변화를 유도하는 것으로 보인다. 16KST에는 300~600ft, 1500~1800ft 등 발생이 다층화하면서 18KST에는 3000ft이상으로 높아지고 지상의 발생횟수가 증가하는 경향을 보이는데 지상에서 중력과 또는 사면에서 계곡을 가로 지르는 풍계(Cross-valley wind)가 나타나고, 안정성층이어야 하기에 18~19KST 대기가 차차 냉각되면서 지상 풍계만 조용히 바뀌어 지형풍인 북풍으로 이어지게 된다. 여름철인 그림 16에서는 9KST이후에 고도차 불연속면의 다음고도까지 고도가 300~450ft의 두께를 가지며 한낮으로 갈수록 두께가 두꺼워지고 있어 부력의 정도를 유추할 수 있겠다. 겨울철과 달리 남풍 시 1,650ft이상에서 고도차 불연속 횟수가 증가하고 3,000ft이상 고도에서 불연속은 주기를 가지고 밤에 성층안정이 되는 시간까지 지속되고 있음은 알 수 있다. 밤과 새벽에도 발생고도는 낮지만 시간이 지남에 따라 급격히 고도가 높아짐을 볼 수 있다. 20KST부터는 150ft에서 고도차 불연속이 나타나서 5KST까지 지속되다가 6~8KST에는 그 층이 급격히 높아지면서 고도차 불연속 횟수가 줄어들고 있다. 이는 울산공항 주변지형의 경계층의 고도 아래에서만 지형풍이 나타나고 일출이후에는 대류에 의해 불연속면이 해소됨을 볼 수 있다. 지형풍의 고도는 겨울철 보다 여름철에 높게 나타나는데 그림 13에서 겨울철의 연직깊이는 해풍 때는 300~750ft, 북풍인 지형풍이 나타날 때는 지상면 또는 300~450ft로 각각 나타나고, 여름철인 그림 14에 의하면 해풍은 1500~4000ft, 지형풍은 150ft~300ft까지 영향을 받지만 일출시간에는 고도차 불안정의 횟수가 증가하고 있다.

R18에서 겨울철에 발생하는 고도차 불연속을 비교하면 18KST이후에는 R18(그림 15)과 R36(그림 17) 모두 지형풍인 북풍이 지상면에서 나타나고 R18에서는 R36과 1시간차를 두고 횟수가 증가하고 있다. 이에 앞서 17KST에는 두 곳 모두에서 3,000ft이상 층에서 변화가 발생하나 R36에서는 1600ft, R18에서는 600ft에서도 각각 변화를 보이는데 해풍에서 지형풍인 북풍으로 바뀌는 경계면에서는 지형의 높이에서 고도차 불연속이 나타남을 볼 수 있다. 낮에는 잘 나타나지 않지만 밤에는 3000ft이상 층에서 약한 고도차 불연속이 나타나고 있어 또 다른 흐름에 대한 불연속이 있음을 알 수 있다.

여름철 R18(그림 18)에서는 300ft이하에서 전 시간에 불연속이 나타나고 있고 1500ft이상 층에서는 11~13KST에 가장 낮다가 시간이 지남에 따라 점차 높아지고 있다. R36에서는 9KST에 고도차 불연속이 높아지며, 나타나는 고도도 여러 층으로 나타나지만 R18에서는 450, 4000ft에서만 뚜렷한 변화를 보일 뿐이고 300~1500ft까지는 고도차 불연속이



[그림 17] R18 겨울철 고도차 풍향 불연속 횟수 시계열도



[그림 18] R18 여름철 고도차 풍향 불연속 횟수 시계열도

뚜렷하지 않다. 이는 영향을 주는 풍계가 R18에서는 R36과 비교해서 높은 고도까지 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이와 같이 중간고도에서 고도차 불연속이 잘 나타나지 않는 것은 부력의 두께가 한 낮에는 약 1,500ft까지 이르러 R36보다 대류복사가 심함을 알 수 있다.

겨울철에는 지상과 상층 그리고 R36과 R18에서 고도차 불연속의 규칙성을 찾기는 쉽지 않지만 여름철에는 지역에 따라 시간차를 두고 오후에 3000ft에서 규칙적인 발생과 조금씩 층이 높아지고 있어 상층에서 나타나는 중력파의 모습이다.

4. 결론 및 토의

일출전 복사냉각에 의한 밀도류의 활강풍(Downslope wind)이 산사면을 따라 내려오나 골의 경사도의 지형적인 요인으로 골짜기에서 바람이 불어 나가게 되어(Down-valley wind) 북풍이 진행된다. 그 깊이에서 역전층(Nocturnal inversion)이 형성되어 이 고도의 상하의 풍계가 다르게 나타나는 불연속이 나타난다. 동쪽과 서쪽의 산능선에서 침강 정도와 계절에 따라 차이는 있으나 약 600ft에서 역전층이 형성되어지고 지형경사도 및 남쪽으로 열린 이유로 인하여 북풍이 갑자기 강화되는 경우는 발생하지 않는다.

일출 후에는 산정상과 골짜기에서 활승류(Upslope wind)가 강화되어 풍계 불연속이 지상과 상층이 동시에 발생하거나 또는 지면이 먼저 발생하며, 그 골짜기를 향하는 바람(Up-valley wind)과 바다에서 불어 들어오는 해풍(Sea breeze)인 남풍이 나타나게 되는데 골짜기 폭이 점차 좁아짐에 따라 한낮에는 풍속이 강화되어 나타나게 된다. 해풍의 변화 시기는 계절과 기압계 변화에 따라 유동적이거나 겨울은 12~18KST, 여름철은 9~21KST에 나타난다.

울산공항 주변의 지형배열과 서쪽 고봉들에 의해 약 300°의 중력파(Gravity wind)가 발

생하나 울산공항이 동해와 가까이 접해있고 산곡풍 및 해륙풍이 더 강하게 영향을 받으므로 풍계가 전이하는 시간에 중력과 서쪽 사면풍이 나타나기도 한다. 전이시간은 겨울철이 17~19KST, 여름철은 18~21KST로 분석되었다.

지형의 풍계변화는 단순하지만 지상과 상층의 상이한 불연속풍계가 나타난다. 겨울철에는 지상에서 750~900ft까지 해풍이 나타나고, 지상면 또는 150~300ft까지 지형풍이 나타난다. 또한, 여름철에는 지상에서 시작해서 1200~1500ft까지 해풍이 나타나고, 지형풍은 350ft에서 시작해서 900ft까지 발달함을 알 수 있다. 북풍이 나타날 때는 단순하게 한 요인이 아니라 해륙풍, 산곡풍, 중력과 등이 복합적으로 작용하는 지형풍(Terrain wind)으로 작용한다.

Wind Profiler의 시간차 불연속을 살펴보면, 겨울철에는 지상에 풍계 변화가 있기 전에 상층에서 풍계 불연속을 약하게 보이나, 여름철에는 지상과 상층이 급격하면서도 왕성하게 변화를 보이고 해풍이 나타나지만, 시간이 지남에 따라 상층에서 지상으로 주기적인 고도감소를 보이며 지상에 전이풍이 나타나는 시간에 사라지거나(R36), 지형풍이 나타나는 시간까지 주기적인 변화를 보이면서 약해진다(R18).

Wind Profiler의 고도차 불연속을 살펴보면, 겨울철보다는 여름철에, 밤보다는 낮에 1500ft이상 고도에서 주기적인 변화를 보이고 있어 중력과 연직변화와 부력의 변화를 잘 보여주고 있고 R36 여름철 시간차 불연속도 (그림 10)에서 지상 면으로 전파되는 시계열도가 잘 설명하여 주고 있다.

5. 참고문헌

김광식, 1992: 기상학사전, 향문사.

박찬귀, 2006: 기상청 지식관리/지식시장: 산악과 특성과 호우사례.

한국기상학회, 1996: 대기과학용어집.

항공기상대, 2001: 2001 항공기상 현업연구(제주공항 해륙풍 특성조사). 145-166.

C. David Whitemann, 2000: Mountain Meteorology fundamentals and applications, Oxford, 139-202.

James R. Holton저, 한국기상학회편, 1999: 대기역학, 시그마프레스, 212-229.

William Blumen, 1990: Atmospheric processes over complex terrain, 299pp.

울산공항 최고·최저기온 예보법 도출

김은숙, 김한준, 김경록, 김진일, 황호성
울산공항기상대

1. 서론

점차 늘어가는 항공기상정보 수요 중에서 최고·최저 기온은 항공기 이착륙에 필요한 이륙 예보 뿐 아니라 공항 시설물 관리, 항공기 정비, 조경관리 등에 유용하게 사용되므로 정확한 예보가 요구되고 있다. 현재 중관기상관서에서는 각 기상대 별로 기온예보 모델인 KF(Kalman Filter) 및 PPM(Perfect Prog Method)이 표출되고 있으며, 장기간의 모델과 실측 자료를 이용하여 높은 결정계수를 가진 회귀식을 만들어 이를 예보에 활용하고 있다. 항공기상대는 공항연직시계열도에서 RDAPS 모델을 이용하여 기온을 예측하고는 있으나 실제 기온과의 오차가 다소 많이 발생하고 있다. 울산공항기상대에서는 지난해(2005년) 5월 이후부터 최고·최저기온예보를 발표하기 시작하였으며 이 기온예보는 울산기상대 기온예보를 참고하여 기온을 예보하고 있다. 하지만 울산기상대에서 발표하는 울산지역의 최고·최저 기온은 공항의 실제기온과는 현저한 차이가 발생하고 있음을 지난 1년간 알게 되었으며, 울산공항의 국지기온예보법이 필요함을 절실히 알게 되었다. 이에 울산공항기상대에서는 최근 2000년 이후에 관측된 울산공항의 최고·최저기온과 예보인자를 이용하여 객관적이고 효율적인 기온 예보법을 도출하기 위하여 본 과제를 수행하게 되었다.

2. 본론

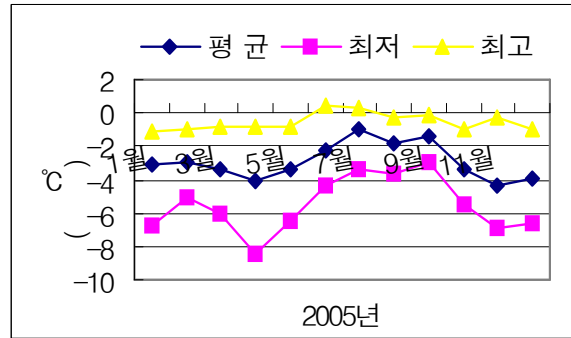
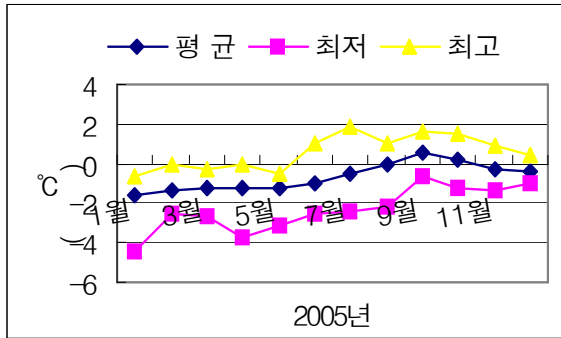
가. 울산(기) 및 울산공항의 최고·최저기온 비교·분석

- 1) 자료조사기간 : 2005.1.1 ~ 2005.12.31(1년간)
- 2) 최고기온 월별, 계절별 비교 결과

최고기온의 경우 [그림1]에서 볼 수 있듯이 1월은 공항이 기상대보다 평균 1.6℃까지 낮은 경향을 보였고 9, 10월을 제외한 모든 달이 낮은 경향을 보였다. 반면 9, 10월은 각각 평균 0.5, 0.2℃ 높았다. 또한 1월은 4.4℃까지 낮은 결과가 나타났으며, 1월 이후로 편차가 점차 줄어드는 경향을 보였다. 6월 이후로는 기상대보다 높은 기온이 나타나는 경우가 증가하였으나 11월 이후로는 다시 낮아지는 경향을 보였다.

3) 최저기온 월별, 계절별 비교결과

최저기온의 경우 [그림2]에서 볼 수 있듯이 전년(annual)이 기상대보다 월 평균 1~3℃ 가량 낮은 경향을 보였으며, 4월에는 최고 8.4℃까지 낮은 결과를 보였다. 7~9월에는 편차가 줄어드는 경향을 보이다가 10월 이후에는 다시 낮아졌다. 6월에 1회, 7월에 3회만이 기상대보다 높은 결과로 나타났다.



[그림35] 최고기온차(공항-기상대)월별비교 [그림36] 최저기온차(공항-기상대)월별비교

나. 자료 및 처리방법

1) 자료기간 : 2000. 3. 1 ~ 2006. 2. 28(6년간)

2) 자료

- 기후자료 : 울산공항(기) 일최고, 최저기온
- 예보인자 : 울산공항 00, 12UTC 풍향, 풍속, 기온, 노점, 포차, 전운량, 중하층운량, 포항고층(850, 700, 500hPa) 00, 12UTC 고도, 풍향, 풍속, 기온, 노점온도, 최근 관측된 최고, 최저기온

3) 자료처리방법(I)

- 기후자료(일최고, 최저기온)와 예보인자와의 상관관계 분석
 - 2000. 3. 1 ~ 2005. 2. 28(5년간)의 자료 이용
 - 00UTC 인자는 당일 최고기온, 12UTC 인자는 익일 최저기온과의 계절별 상관계수 도출
 - 계절별로 상관계수가 높은 10개의 예보인자 추출
- 다중회귀 분석법을 이용한 최고·최저기온 예보식 생산
 - 2000. 3. 1 ~ 2005. 2. 28(5년간)의 자료 이용
 - 계절별로 상관계수가 높은 5,6,...10개의 예보인자를 가지는 예보식 생산
 - 00UTC 인자는 당일 최고기온, 12UTC 인자는 익일 최저기온과의 관계를 이용한 최고·최저기온 예보식 생산

- 2005. 3. 1 ~ 2006. 2. 28(1년간)의 자료를 이용하여 MSE를 산출
- 각 계절별 6개의 예보식에서 산출된 MSE 중 가장 작은 값을 가지는 예보식의 예보인자 수를 최적 예보인자수로 결정
- 최고·최저기온 예보식 검증
 - 2005. 3. 1 ~ 2006. 2. 28(1년간)의 자료 이용
 - RMSE, BIAS, AM 등을 이용하여 자료의 정확도 분석

4) 자료처리방법(II)

자료기간 및 처리방법은 위의 3)의 자료처리방법(I)과 동일하다. 그러나 기후자료와 예보인자와의 상관관계 및 예보식 생산에 있어 전일 12UTC 및 21UTC 자료를 이용하는 점에서 차이가 있다.

다. 통계처리방법

1) 상관계수(correlation coefficient)

하나의 변수가 다른 변수와 어느 정도 밀접한 관련성을 갖는지 알아보기 위해 사용하는 통계적방법이다. $-1 \leq r \leq 1$ 을 만족하며, r 이 1에 가까울수록 양의 상관관계가 강하며, -1에 가까울수록 음의 상관관계가 강하다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

2) 다중회귀분석(multiple regression)

하나의 종속변수가 다른 여러개의 독립변수들에 의해 어떻게 설명 또는 예측되는지를 알아보기 위한 통계적방법이며 식은 다음과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e$$

3) 다중상관계수(multiple correlation coefficient)

종속변수 y 와 추정된 회귀식에 의해 계산된 y 의 추정값 \hat{Y} 의 피어슨 상관계수이며, 1에 가까운 높은 다중상관계수는 추정된 회귀식이 종속변수 값을 적은 오차로 추측할 수 있음을 의미한다.

4) MSE(mean square error)

관측값과 추정값의 차인 잔차 제곱합의 평균값이며 이들의 값이 작을수록 적합한 모형이 자료를 잘 설명한다고 할 수 있다.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}$$

5) RMSE(root mean square error)

통계학에서 표준편차를 의미한다. 즉 예상한 값과 실제 관측결과가 평균적으로 얼마만큼 차이가 있는지를 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

6) BIAS

추정자료가 평균값으로부터 벗어난 정도를 나타낸다.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{N}$$

7) AM(절대편차평균)

추정자료와 실제 관측결과와의 절대 편차값의 평균으로 추정값이 실황값과 실제로 얼마만큼 차이가 있는지를 나타낸다.

$$AM = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{N}$$

라. 분석결과(I)

1) 기후자료(일최고, 최저기온)와 예보인자와의 상관관계 분석

2000. 3. 1 ~ 2005. 2. 28(5년간) 울산공항의 일 최고, 최저기온과 예보인자(울산공항 00, 12UTC 풍향, 풍속, 기온, 노점, 포차, 전운량, 중하층운량, 최근관측된 최고, 최저기온, 포항고층(850, 700, 500hPa) 00, 12UTC 고도, 풍향, 풍속, 기온, 노점온도 등) 자료를 이용하여 계절별로 상관계수를 도출하였다. 이때 00UTC 예보인자는 당일 최고기온과 12UTC 자료는 익일 최저기온을 이용하여 최고, 최저기온과 각각의 예보인자 사이의 계절별 상관관계를 알아보았다. 이렇게 도출된 상관계수들 중 계절별로 상관계수가 높은 10개의 예보인자를 추출한 결과는 <표 1>과 <표 2>와 같다.

<표 1>은 00UTC 예보인자와 최고기온과의 상관계수를 나타낸 것인데, 이 표에서 알 수 있듯이 최고기온에 가장 영향을 미치는 인자는 지상기온, 850hPa기온, 700hPa기온,

노점온도 및 최저기온 등의 순서로 나타났다. 그리고 겨울에는 지상기온 보다는 850hPa기온, 700hPa기온이 최고기온에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

<표 2>는 12UTC 예보인자와 익일 최저기온과의 상관계수를 나타낸 것인데, 최저기온도 역시 최고기온과 마찬가지로 지상기온이 높은 상관관계를 나타냈으며 노점온도가 그 다음으로 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.

<표 1> 00UTC 예보인자와 최고기온과의 상관계수

| 봄 | | 여름 | | 가을 | | 겨울 | |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| 기 온 | 0.89 | 기 온 | 0.89 | 기 온 | 0.89 | 850hPa기온 | 0.84 |
| 850hPa기온 | 0.86 | 850hPa기온 | 0.72 | 850hPa기온 | 0.88 | 700hPa기온 | 0.77 |
| 700hPa기온 | 0.71 | 노점온도 | 0.56 | 노점온도 | 0.86 | 기 온 | 0.72 |
| 500hPa고도 | 0.67 | 700hPa기온 | 0.51 | 700hPa기온 | 0.84 | 노점온도 | 0.68 |
| 최저기온 | 0.67 | 최저기온 | 0.47 | 최저기온 | 0.80 | 700hPa고도 | 0.60 |
| 노점온도 | 0.64 | 500hPa고도 | 0.44 | 500hPa기온 | 0.77 | 500hPa기온 | 0.60 |
| 700hPa고도 | 0.60 | 전운량 | -0.42 | 500hPa고도 | 0.65 | 500hPa고도 | 0.55 |
| 500hPa기온 | 0.56 | 700hPa고도 | 0.39 | 700hPa고도 | 0.58 | 최저기온 | 0.54 |
| 500hPa풍속 | -0.44 | 중하층운량 | -0.39 | 850hPa노점 | 0.56 | 풍 속 | -0.44 |
| 850hPa노점 | 0.35 | 850hPa풍향 | 0.38 | 500hPa풍속 | -0.46 | 습 수 | -0.43 |

<표 2> 12UTC 예보인자와 최저기온과의 상관계수

| 봄 | | 여름 | | 가을 | | 겨울 | |
|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 기 온 | 0.90 | 노점온도 | 0.92 | 기 온 | 0.96 | 기 온 | 0.83 |
| 노점온도 | 0.87 | 기 온 | 0.86 | 노점온도 | 0.95 | 노점온도 | 0.77 |
| 850hPa기온 | 0.85 | 700hPa기온 | 0.71 | 500hPa기온 | 0.88 | 500hPa고도 | 0.67 |
| 700hPa기온 | 0.83 | 500hPa기온 | 0.71 | 700hPa기온 | 0.86 | 최고기온 | 0.66 |
| 500hPa기온 | 0.81 | 500hPa고도 | 0.69 | 850hPa기온 | 0.86 | 700hPa기온 | 0.66 |
| 최고기온 | 0.76 | 850hPa노점 | 0.68 | 500hPa고도 | 0.83 | 500hPa기온 | 0.66 |
| 500hPa고도 | 0.74 | 850hPa기온 | 0.64 | 최고기온 | 0.83 | 850hPa기온 | 0.62 |
| 850hPa노점 | 0.63 | 700hPa노점 | 0.53 | 850hPa노점 | 0.69 | 700hPa고도 | 0.58 |
| 700hPa고도 | 0.58 | 최고기온 | 0.48 | 700hPa고도 | 0.59 | 전운량 | 0.52 |
| 700hPa노점 | 0.57 | 500hPa노점 | 0.47 | 전운량 | 0.56 | 850hPa노점 | 0.51 |

2) 다중회귀 분석법을 이용한 최고최저기온 예보식 생산

다중회귀분석법을 이용하여 2000. 3. 1 ~ 2005. 2. 28(5년간) 울산공항 일 최고, 최저기온과 계절별로 가장 상관관계가 높은 5, 6, 10개의 예보인자(표 1, 2 참조)를 가지는 기온 예보식을 도출하였다. 역시 00UTC 인자는 당일 최고기온과 12UTC 인자는 익일 최저기온과의 관계를 이용하여 최고, 최저기온 예보식을 생산하였다.

이렇게 생산한 예보식을 2005. 3. 1 ~ 2006. 2. 28(1년간)의 자료를 이용하여 MSE를 계산해 보았다. 각 계절별로 생산된 6개의 예보식에서 산출된 MSE 중 가장 작은 값을 가지는 예보식의 예보인자 수를 최적 예보인자수로 결정하였다.

최고기온에 대한 계절별 예보식에 대한 MSE값을 계산한 결과 봄에는 5.078~5.217, 여름에는 1.931~2.048, 가을에는 3.204~3.332, 겨울에는 3.430~4.614의 분포를 보였으며 이들 중 가장 작은 값을 가지는 최고기온 예보식 및 그 식에 대한 다중상관계수, MSE값이 <표 3>과 같다.

<표 3> 계절별 최고기온 예보식(다중회귀식) 및 다중상관계수, MSE

| 계절 | 최고기온 예보식(다중회귀식) | 다중상관계수 | MSE |
|----|---|--------|-------|
| 봄 | $y=47.00+0.78x_1+0.48x_2-0.04x_3-0.01x_4-0.32x_5-0.04x_6$ 독립변수 : 기온(x_1), 850hPa기온(x_2), 700hPa기온(x_3), 500hPa고도(x_4), 최저기온(x_5), 노점온도(x_6) | 0.927 | 5.078 |
| 여름 | $y=5.50+0.90x_1+0.27x_2+0.07x_3-0.05x_4-0.20x_5+0.0002x_6-0.0006x_7-0.12x_8+0.02x_9+0.003x_{10}$ 독립변수 : 기온(x_1), 850hPa기온(x_2), 노점온도(x_3), 700hPa기온(x_4), 최저기온(x_5), 500hPa고도(x_6), 700hPa고도(x_7), 전운량(x_8), 하층운량(x_9), 850hPa풍향(x_{10}) | 0.924 | 1.931 |
| 가을 | $y=-9.22+0.71x_1+0.37x_2+0.07x_3+0.03x_4-0.41x_5-0.01x_6+0.0007x_7+0.005x_8+0.03x_9-0.017x_{10}$ 독립변수 : 기온(x_1), 850hPa기온(x_2), 노점온도(x_3), 700hPa기온(x_4), 최저기온(x_5), 500hPa기온(x_6), 500hPa고도(x_7), 700hPa고도(x_8), 850hPa노점(x_9), 500hPa풍속(x_{10}) | 0.942 | 3.204 |
| 겨울 | $y=2.55+0.43x_1+0.13x_2+0.50x_3-0.0001x_4+0.002x_5-0.07x_6+0.0001x_7-0.27x_8-0.15x_9$ 독립변수 : 850hPa기온(x_1), 700hPa기온(x_2), 기온(x_3), 노점온도(x_4), 700hPa고도(x_5), 500hPa기온(x_6), 500hPa고도(x_7), 최저기온(x_8), 풍속(x_9) | 0.885 | 3.430 |

계절별로 예보인자 수가 봄에는 6개, 여름 및 가을은 10개, 겨울에는 9개를 가질 때

MSE 값이 가장 작게 나타나며 최적의 예보식을 가지게 된다. 계절별로 비교해 볼 때 여름이 가장 작은 MSE를 가지며 가장 적합한 식을 가진다고 할 수 있다. 또한 계절별 다중상관계수는 봄, 여름, 가을은 0.9이상으로 아주 높으며 겨울은 0.885로 다른 계절에 비해서는 낮지만 비교적 높은 값으로 나타났다.

최저기온에 대한 계절별 예보식에 대한 MSE값을 계산한 결과 봄에는 5.027~5.692, 여름에는 1.418~1.864, 가을에는 3.106~3.506, 겨울에는 4.713~6.323의 분포를 보였으며 이들 중 가장 작은 값을 가지는 최저기온 예보식 및 그 식에 대한 다중상관계수, MSE값이 <표 4>와 같다.

계절별로 예보인자 수가 봄과 여름은 10개, 가을과 겨울은 5개를 가질 때 MSE 값이 가장 작게 나타나며 최적의 예보식을 가지게 된다. 계절별로 비교해 볼 때 최저기온의 경우에도 여름이 가장 작은 MSE를 가지며 가장 적합한 식을 가진다고 할 수 있다. 또한 최저기온 예보식의 계절별 다중상관계수 역시 봄, 여름, 가을은 0.9이상으로 아주 높으며 겨울은 0.874로 다른 계절에 비해서는 낮은 값을 나타냈다.

<표 4> 계절별 최저기온 예보식(다중회귀식) 및 다중상관계수, MSE

| 계절 | 최고기온 예보식(다중회귀식) | 다중상관계수 | MSE |
|----|---|--------|-------|
| 봄 | $y=8.15+0.61x_1+0.17x_2+0.04x_3+0.08x_4+0.19x_5-0.17x_6+0.001x_7+0.22x_8-0.003x_9+0.03x_{10}$ 독립변수 : 기온(x_1), 노점온도(x_2), 850hPa기온(x_3), 700hPa기온(x_4), 500hPa기온(x_5), 최고기온(x_6), 500hPa고도(x_7), 850hPa노점(x_8), 700hPa고도(x_9), 700hPa노점(x_{10}) | 0.943 | 5.027 |
| 여름 | $y=-38.0+0.36x_1+0.38x_2+0.05x_3+0.05x_4+0.01x_5+0.07x_6+0.001x_7+0.02x_8-0.06x_9+0.017x_{10}$ 독립변수 : 노점온도(x_1), 기온(x_2), 700hPa기온(x_3), 500hPa기온(x_4), 500hPa고도(x_5), 850hPa노점(x_6), 850hPa기온(x_7), 700hPa노점(x_8), 최고기온(x_9), 500hPa노점(x_{10}) | 0.944 | 1.418 |
| 가을 | $y=1.05+0.67x_1+0.18x_2+0.17x_3-0.03x_4+0.04x_5$ 독립변수 : 기온(x_1), 노점온도(x_2), 500hPa기온(x_3), 700hPa기온(x_4), 850hPa기온(x_5) | 0.968 | 3.106 |
| 겨울 | $y=-62.04+0.66x_1+0.13x_2+0.01x_3-0.18x_4-0.01x_5$ 독립변수 : 기온(x_1), 노점온도(x_2), 500hPa고도(x_3), 최고기온(x_4), 700hPa기온(x_5) | 0.874 | 4.713 |

3) 최고·최저기온 예보식 검증 결과

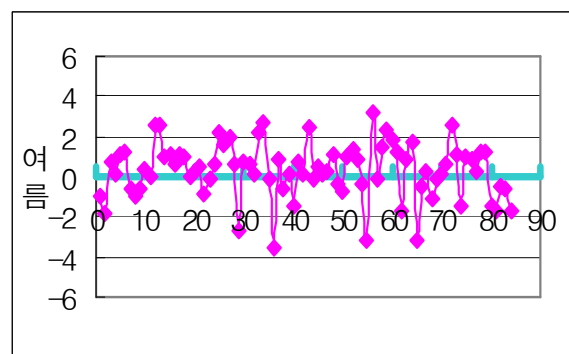
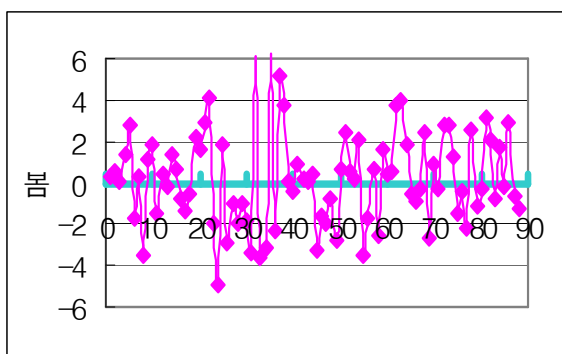
앞에서 생산한 최고, 최저기온예보식(다중회귀식) 검증을 위하여 2005. 3. 1 ~ 2006. 2. 28 (1년간)의 자료와 RMSE, MSE, BIAS, AM(절대편차평균) 등의 예보검증변수를 이용하였으며 그 결과는 <표 5>와 <표 6>과 같다.

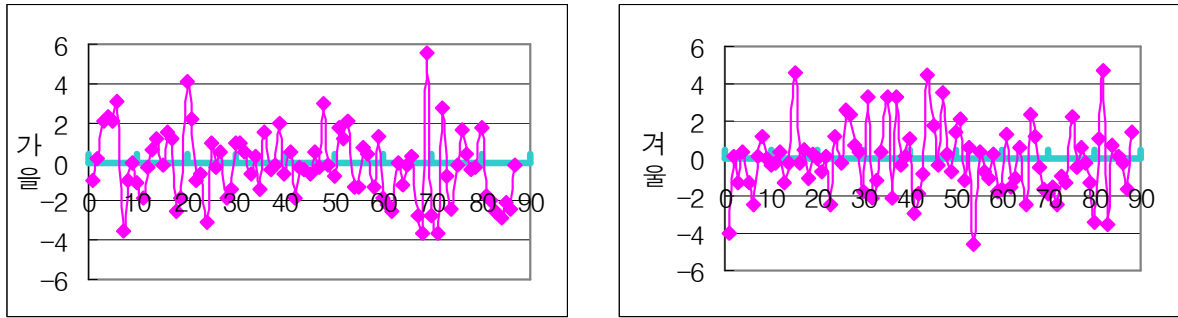
위의 예보식들을 검증한 결과 <표 5>의 최고기온의 경우 RMSE가 1.389~2.253℃의 편차를 보이며 비교적 정확한 예보식임이 검증되었다. 그 중에서도 기온변화가 적은 여름을 가장 정확히 예보하고 있음을 알 수 있었다. BIAS는 -0.1~0.3℃의 분포를 보이고 있고 여름철에 평균 0.3℃ 정도 높은 기온을 예보하고 있음을 알 수 있으며, 겨울의 경우에는 0.1℃ 정도 낮게 예상하고 있다. 절대편차평균 값인 AM 값은 1.096~1.779℃로 예측값과 실황과의 실제편차는 여름에는 1℃내외로 가장 작으며, 기온 변화가 심한 봄의 경우 1.779℃로 가장 크게 나타났다. 또한 AM(절대편차평균) 값이 2℃ 미만인 경우를 보면 역시 여름이 84.5%로 가장 많으며 봄이 63.6%로 가장 작다. 편차 4℃ 미만의 경우는 여름이 100%로 가장 높으며 봄에도 93.2%로 높은 적중률을 나타냈다.

<표 5> 계절별 최고기온 예보식(다중회귀식) 검증결과

| 계절 | RMSE | MSE | BIAS | AM | 편차 2℃ 미만 | 편차 4℃ 미만 |
|----|-------|-------|--------|-------|----------|----------|
| 봄 | 2.253 | 5.078 | 0.207 | 1.779 | 63.6% | 93.2% |
| 여름 | 1.389 | 1.931 | 0.303 | 1.096 | 84.5% | 100% |
| 가을 | 1.790 | 3.204 | -0.220 | 1.412 | 71.3% | 97.7% |
| 겨울 | 1.852 | 3.430 | -0.111 | 1.413 | 73.9% | 94.3% |

[그림 3]은 최고기온예보에 대한 예측 - 실황값에 대한 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 봄철에 가장 큰 편차를 보이고 있으며 반대로 여름에는 편차가 가장 작다. 봄과 여름은 각각 평균 0.207℃와 0.303℃ 만큼 기온을 높게 예보하고 있으며 반대로 가을, 겨울철에는 각각 평균 0.22와 0.11℃ 정도 낮게 예보하고 있다.





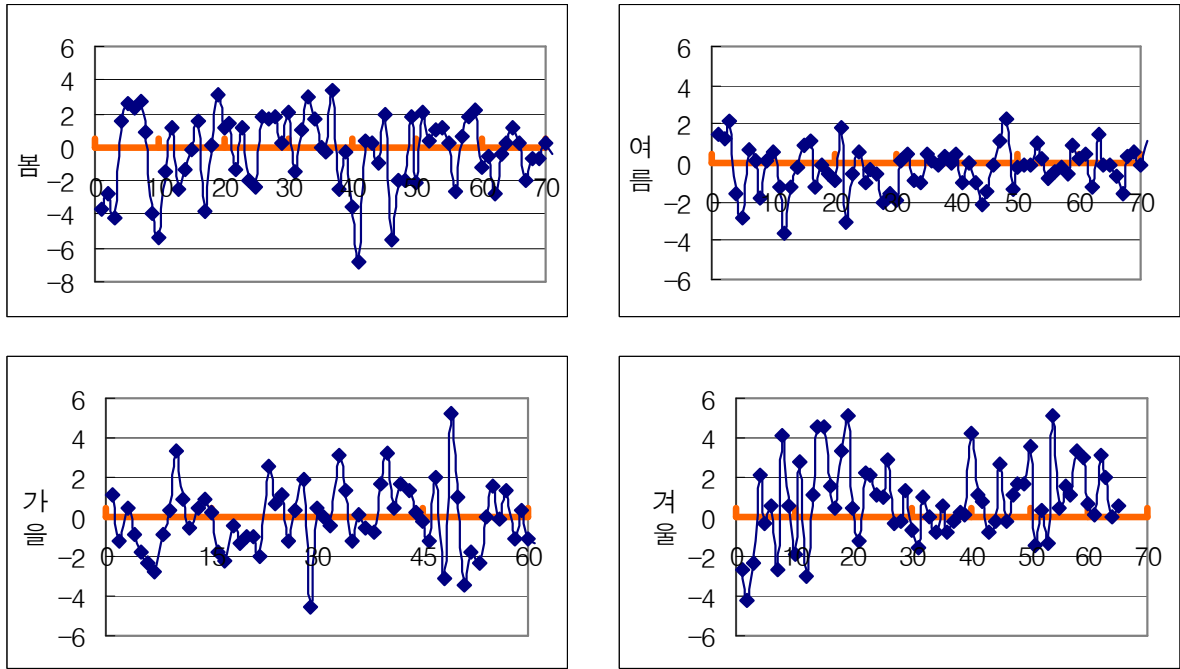
[그림 3] 최고기온 예보에 대한 계절별 예측 - 실황 편차 분포

최저기온 예보식을 검증한 결과는 <표 6>과 같으며 RMSE가 1.190~2.242℃의 편차를 보이며 최고기온의 경우보다 더 정확한 결과로 검증되었다. 역시 기온변화가 적은 여름을 가장 정확히 예보하고 있었고, BIAS는 -0.09~0.847℃의 분포를 보이고 있고 겨울철의 경우 평균 0.8℃ 정도로 높게 나타나 예보성능을 떨어뜨리고 있다. 반면 봄의 경우에는 0.3℃ 정도 낮게 예상하고 있다. 절대편차평균 값인 AM 값은 0.908~1.780℃로 예측값과 실황과의 실제편차는 여름에는 1℃이내로 가장 작으며, 역시 기온 변화가 심한 봄의 경우 1.8℃내외로 가장 크게 나타났다. 또한 AM(절대편차평균) 값이 2℃ 미만인 경우를 보면 역시 여름이 90.1%로 가장 많으며 봄이 61.9%로 최고기온의 경우보다 여름 편차가 더 작고 봄의 경우에는 편차분포가 더 컸다. 편차 4℃미만의 경우 겨울은 89.2%로 가장 큰 편차분포를 보이고 있음을 알 수 있었다.

<표 6> 계절별 최저기온 예보식(다중회귀식) 검증결과

| 계절 | RMSE | MSE | BIAS | AM | 편차 2℃ 미만 | 편차 4℃미만 |
|----|-------|-------|--------|-------|----------|---------|
| 봄 | 2.242 | 5.026 | -0.297 | 1.780 | 61.9% | 94.36% |
| 여름 | 1.190 | 1.418 | -0.273 | 0.908 | 90.1% | 100% |
| 가을 | 1.762 | 3.106 | -0.095 | 1.380 | 77.0% | 96.7% |
| 겨울 | 2.170 | 4.713 | 0.847 | 1.673 | 64.6% | 89.2% |

[그림 4]는 최저기온예보에 대한 예측 - 실황값에 대한 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 봄철에 가장 큰 편차를 보이고 있으며 겨울철도 편차가 크다. 반면 여름에는 편차가 가장 작다. 봄, 여름, 가을철은 각각 평균 0.297℃, 0.273℃, 0.095℃ 만큼 기온을 낮게 예보하고 있으며 반대로 겨울철에는 평균 0.847℃ 정도나 높게 예보하고 있어 예보성능을 떨어뜨리고 있다.



[그림 4] 최저기온 예보에 대한 계절별 예측 - 실황 편차 분석 결과

마. 분석결과(II)

1) 최고·최저기온 예보식(I)의 문제점 및 한계

앞에서 생산한 최고, 최저기온예보식(다중회귀식)을 검증한 결과 아주 높은 적중률을 나타내며 비교적 정확한 예보식임이 검증되었다. 하지만 이 예보식은 00UTC 예보인자를 이용하여 당일 최고기온을, 12UTC 예보인자를 이용하여 익일 최저기온을 예보하는 예보식으로 실제로 최고, 최저 기온을 발표하는 시간에는 그 식에 적용되는 예보인자의 실황을 알 수가 없으며 때문에 수치예보된 기상상태를 예보식에 적용하여 기온을 예보해야만 한다. 이 과정에서 수치예보된 기상정보의 오차에 대한 편차가 추가로 발생하게 되는 문제점이 발생하게 된다. 그러므로 아무리 정확한 예보식이 존재한다고 하더라도 수치예보 자료에 오차가 발생하면 예보결과는 나빠지게 되는 것이다.

위의 이런 문제점을 해결하고자 이번에는 이전에 발생한 실황을 위주로 예보식을 재생산해 보기로 하였다. 기온예보를 발표하는 시점인 21UTC를 기준으로 12UTC와 21UTC의 기상자료를 이용하기로 하였다. 12UTC의 울산공항 기상자료와 포항고층자료를 기본자료로 이용하였으며, 기온예보를 발표하는 시점에서 가장 최근 자료인 21UTC의 울산공항 기상실황을 추가로 이용하여 당일 최고기온과 익일 최저기온을 예보하는 예보식을 생산하기로 하였다. 앞의 최고, 최저기온예보식과의 구별을 위하여 이번에 도출하는 예보식을 예보식(II)로 부르기로 하였다.

2) 기후자료(일최고, 최저기온)와 예보인자와의 상관관계 분석

2000. 3. 1 ~ 2005. 2. 28(5년간) 울산공항 일 최고, 최저기온과 예보인자(울산공항 12UTC 및 21UTC 풍향, 풍속, 기온, 노점, 포차, 전운량, 중하층운량, 최근관측된 최고, 최저기온, 포향고층(850, 700, 500hPa) 12UTC 고도, 풍향, 풍속, 기온, 노점온도 등) 자료를 이용하여 계절별로 상관계수를 도출하였다. 이때 위의 예보인자를 이용하여 당일 최고기온 및 익일 최저기온과 예보인자 사이의 계절별 상관관계를 알아보았다. 이렇게 도출된 상관계수들 중 계절별로 상관계수가 높은 10개의 예보인자를 추출한 결과는 <표 7>과 <표 8>과 같다.

<표 7>은 12UTC 및 21UTC 예보인자와 최고기온과의 상관계수를 나타낸 것인데, 이 표에서 알 수 있듯이 최고기온에 가장 영향을 미치는 인자는 전날 최고기온, 850hPa기온, 12UTC기온, 노점온도, 700hPa기온 등의 순서로 나타났다. 역시 겨울에는 지상기온 보다는 850hPa기온이 최고기온에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

<표 7> 12UTC 및 21UTC 예보인자와 최고기온과의 상관계수

| 봄 | | 여름 | | 가을 | | 겨울 | |
|----------|------|----------|-------|----------|------|----------|------|
| 최고기온 | 0.78 | 최고기온 | 0.72 | 최고기온 | 0.85 | 850hPa기온 | 0.75 |
| 850hPa기온 | 0.77 | 850hPa기온 | 0.71 | 850hPa기온 | 0.85 | 최고기온 | 0.73 |
| 12UTC기온 | 0.74 | 12UTC기온 | 0.69 | 700hPa기온 | 0.82 | 700hPa고도 | 0.73 |
| 12UTC노점 | 0.66 | 12UTC노점 | 0.55 | 21UTC노점 | 0.81 | 500hPa고도 | 0.72 |
| 700hPa기온 | 0.65 | 21UTC노점 | 0.50 | 12UTC노점 | 0.81 | 700hPa기온 | 0.69 |
| 21UTC노점 | 0.62 | 700hPa기온 | 0.50 | 12UTC기온 | 0.78 | 21UTC노점 | 0.60 |
| 500hPa고도 | 0.60 | 21UTC기온 | 0.49 | 500hPa고도 | 0.78 | 850hPa고도 | 0.56 |
| 21UTC기온 | 0.59 | 500hPa고도 | 0.49 | 21UTC기온 | 0.74 | 12UTC노점 | 0.54 |
| 500hPa기온 | 0.51 | 700hPa고도 | 0.42 | 500hPa기온 | 0.74 | 12UTC기온 | 0.50 |
| 700hPa고도 | 0.51 | 21UTC전운량 | -0.38 | 700hPa고도 | 0.63 | 21UTC기온 | 0.50 |

<표 8>은 12UTC 및 21UTC 예보인자와 익일 최저기온과의 상관계수를 나타낸 것인데, 최저기온은 최고기온과는 달리 전날 최고기온이 그리 큰 영향을 미치지 않는 것이다. 반면 12UTC와 21UTC의 기온과 노점온도가 가장 큰 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

<표 8> 12UTC 및 21UTC 예보인자와 최저기온과의 상관계수

| 봄 | | 여름 | | 가을 | | 겨울 | |
|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 21UTC노점 | 0.84 | 21UTC노점 | 0.84 | 21UTC기온 | 0.91 | 500hPa고도 | 0.71 |
| 850hPa기온 | 0.83 | 21UTC기온 | 0.83 | 21UTC노점 | 0.91 | 700hPa고도 | 0.68 |
| 12UTC기온 | 0.83 | 12UTC노점 | 0.83 | 12UTC기온 | 0.89 | 21UTC노점 | 0.64 |
| 21UTC기온 | 0.82 | 12UTC기온 | 0.78 | 12UTC노점 | 0.88 | 700hPa기온 | 0.63 |
| 700hPa기온 | 0.81 | 700hPa기온 | 0.71 | 700hPa기온 | 0.87 | 21UTC기온 | 0.61 |
| 12UTC노점 | 0.80 | 500hPa기온 | 0.70 | 500hPa고도 | 0.87 | 850hPa기온 | 0.59 |
| 500hPa고도 | 0.78 | 500hPa고도 | 0.70 | 500hPa기온 | 0.86 | 500hPa기온 | 0.59 |
| 전일최고 | 0.76 | 850hPa기온 | 0.63 | 850hPa기온 | 0.84 | 850hPa고도 | 0.58 |
| 500hPa기온 | 0.75 | 850hPa노점 | 0.56 | 전일최고 | 0.81 | 전일최고 | 0.57 |
| 700hPa고도 | 0.65 | 700hPa고도 | 0.47 | 700hPa고도 | 0.66 | 12UTC노점 | 0.57 |

3) 중회귀 분석법을 이용한 최고·최저기온 예보식(II) 생산

다중회귀분석법을 이용하여 2000. 3. 1 ~ 2005. 2. 28(5년간) 울산공항 일 최고, 최저기온과 계절별로 가장 상관관계가 높은 5, 6, 10개의 예보인자(표 7, 8 참조)를 가지는 기온 예보식을 도출하였다. 이때 12UTC 및 21UTC 인자를 이용하여 당일 최고기온과 익일 최저기온을 예보하는 최고, 최저기온 예보식을 생산하였다.

이렇게 생산한 예보식을 2005. 3. 1 ~ 2006. 2. 28(1년간)의 자료를 이용하여 MSE를 계산해 보았다. 각 계절별로 생산된 6개의 예보식에서 산출된 MSE 중 가장 작은 값을 가지는 예보식의 예보인자 수를 최적 예보인자수로 결정하였다.

최고기온에 대한 계절별 예보식에 대한 MSE값을 계산한 결과 봄에는 14.129~14.472, 여름에는 5.695~6.218, 가을에는 6.005~6.361, 겨울에는 7.218~7.874의 분포를 보였으며 이들 중 가장 작은 값을 가지는 최고기온 예보식(II) 및 그 식에 대한 다중상관계수, MSE값이 <표 9>와 같다.

계절별로 예보인자 수가 봄과 가을은 9개, 여름과 겨울에는 10개를 가질 때 MSE 값이 가장 작게 나타나며 최적의 예보식을 가지게 된다. 계절별로 비교해 볼 때 여름이 가장 작은 MSE를 가지며 가장 적합한 식을 가진다고 할 수 있다. 또한 계절별 다중상관계수는 가을에만 0.9이상으로 높게 나타나며 봄, 여름, 겨울은 0.8 이상으로 나타났다.

<표 9> 계절별 최저기온 예보식(II) 및 다중상관계수, MSE

| 계절 | 최고기온 예보식(II) | 다중상관계수 | MSE |
|----|---|--------|--------|
| 봄 | $y=10.08+0.36x_1+0.33x_2+0.21x_3+0.10x_4+0.86x_5+0.07x_6-0.0007x_7-0.23x_8-0.17x_9$ 독립변수 : 최고기온(x_1), 850hPa기온(x_2), 12UTC기온(x_3), 12UTC노점(x_4), 700hPa기온(x_5), 21UTC노점(x_6), 500hPa고도(x_7), 21UTC기온(x_8), 500hPa기온(x_9) | 0.822 | 14.129 |
| 여름 | $y=77.82+0.13x_1+0.38x_2+0.32x_3-0.06x_4+0.20x_5+0.21x_6+0.03x_7-0.03x_8+0.03x_9-0.49x_{10}$ 독립변수 : 최고기온(x_1), 850hPa기온(x_2), 12UTC기온(x_3), 12UTC노점(x_4), 21UTC노점(x_5), 700hPa기온(x_6), 21UTC기온(x_7), 500hPa고도(x_8), 700hPa고도(x_9), 21UTC전운량(x_{10}) | 0.842 | 5.695 |
| 가을 | $y=17.80+0.42x_1+0.27x_2+0.22x_3+0.50x_4-0.19x_5+0.17x_6-0.001x_7-0.45x_8-0.08x_9$ 독립변수 : 최고기온(x_1), 850hPa기온(x_2), 700hPa기온(x_3), 21UTC노점(x_4), 12UTC노점(x_5), 12UTC기온(x_6), 500hPa고도(x_7), 21UTC기온(x_8), 500hPa기온(x_9) | 0.906 | 6.005 |
| 겨울 | $y=-32.99+0.19x_1+0.40x_2+0.05x_3-0.02x_4+0.06x_5+0.23x_6-0.01x_7-0.11x_8-0.003x_9-0.17x_{10}$ 독립변수 : 850hPa기온(x_1), 최고기온(x_2), 700hPa고도(x_3), 500hPa고도(x_4), 700hPa기온(x_5), 21UTC노점(x_6), 850hPa고도(x_7), 12UTC노점(x_8), 12UTC기온(x_9), 21UTC기온(x_{10}) | 0.845 | 7.218 |

최저기온에 대한 계절별 예보식에 대한 MSE값을 계산한 결과 봄에는 6.562~7.117, 여름에는 1.754~1.813, 가을에는 6.498~7.275, 겨울에는 8.127~8.893의 분포를 보였으며 이들 중 가장 작은 값을 가지는 최저기온 예보식(II) 및 그 식에 대한 다중상관계수, MSE값이 <표 10>과 같다.

계절별로 예보인자 수가 봄과 가을은 6개, 여름은 10개, 겨울은 5개를 가질 때 MSE값이 가장 작게 나타나며 최적의 예보식을 가지게 된다. 계절별로 비교해 볼 때 가장 작은 MSE를 가지는 여름이 가장 적합한 식을 가진다고 할 수 있다. 또한 최저기온 예보식의 계절별 다중상관계수는 가을의 경우에만 0.9이상으로 아주 높으며 겨울은 0.743으로 봄과 여름에 비해서도 낮은 값을 나타냈다.

<표 10> 계절별 최저기온 예보식(II) 및 다중상관계수, MSE

| 계절 | 최고기온 예보식(II) | 다중상관계수 | MSE |
|----|--|--------|-------|
| 봄 | $y=2.35+0.23x_1+0.12x_2+0.22x_3+0.11x_4+0.17x_5-0.01x_6$ 독립변수 : 21UTC노점(x_1), 850hPa기온(x_2), 12UTC기온(x_3), 21UTC기온(x_4), 700hPa기온(x_5), 12UTC노점(x_6) | 0.879 | 6.562 |
| 여름 | $y=-9.33+0.22x_1+0.17x_2+0.19x_3+0.09x_4+0.05x_5$ $+0.20x_6-0.005x_7+0.002x_8-0.01x_9+0.01x_{10}$ 독립변수 : 21UTC노점(x_1), 21UTC기온(x_2), 12UTC노점(x_3), 12UTC기온(x_4), 700hPa기온(x_5), 500hPa기온(x_6), 500hPa고도(x_7), 850hPa기온(x_8), 850hPa노점(x_9), 700hPa고도(x_{10}) | 0.882 | 1.754 |
| 가을 | $y=-98.49+0.34x_1+0.15x_2+0.22x_3-0.11x_4+0.14x_5+0.02x_6$ 독립변수 : 21UTC기온(x_1), 21UTC노점(x_2), 12UTC기온(x_3), 12UTC노점(x_4), 700hPa기온(x_5), 500hPa고도(x_6) | 0.937 | 6.498 |
| 겨울 | $y=-89.74+0.01x_1+0.01x_2+0.11x_3-0.01x_4+0.18x_5$ 독립변수 : 500hPa고도(x_1), 700hPa고도(x_2), 21UTC노점(x_3), 700hPa기온(x_4), 21UTC기온(x_5) | 0.743 | 8.127 |

4) 최고·최저기온 예보식 검증 결과

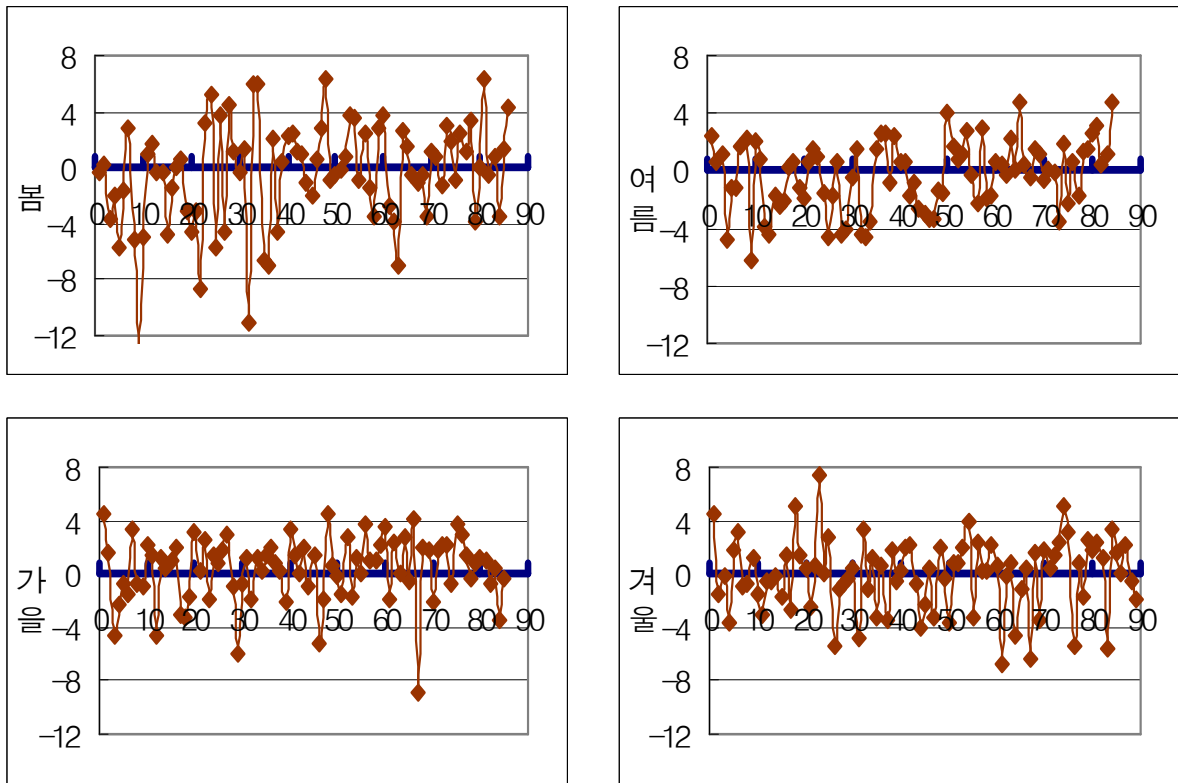
앞에서 생산한 최고, 최저기온예보식(II) 검증을 위하여 2005. 3. 1 ~ 2006. 2. 28 (1년간)의 자료와 RMSE, MSE, BIAS, AM(절대편차평균) 등의 예보검증변수를 이용하였으며 그 결과는 <표 11>과 <표 12>와 같다.

위의 예보식들을 검증한 결과인 <표 11> 최고기온의 경우 RMSE가 2.386~3.759°C의 편차를 보이며 최고기온 예보식(I)에 비하여 낮은 적중률을 나타냈다. 그 중에서도 기온변화가 적은 여름이 가장 작은 편차를 보이며 비교적 정확히 예보하고 있음을 알 수 있었다. BIAS는 -0.07~0.36°C의 분포를 보이고 있고 이 예보식은 가을철에 평균 0.36°C 정도 기온을 높게 예보하고 있음을 알 수 있으며, 겨울의 경우에는 0.07°C 정도 낮게 예상하고 있다. 절대편차평균 값인 AM 값은 1.935~2.862°C로 예측값과 실황과의 실제편차는 여름에는 1.9°C내외로 가장 작으며, 역시 기온 변화가 심한 봄의 경우에는 2.86°C로 가장 크게 나타났다. 또한 AM(절대편차평균) 값이 2°C 미만인 경우를 보면 예보식(I)보다는 훨씬 낮은 분포를 나타냈으며 가장 높게 나타난 가을의 경우에도 61.2%로 편차가 크게 나타났다. 예보식(I)과 비교해 할 때 차이점은 여름과 가을철 적중률이 비슷하다는 점이다. 편차 4°C미만의 경우는 가을이 90.6%이며, 여름이 86.9%, 겨울이 86.6%로 비슷한 편차분포를 보였으며 봄에는 75.6%로 높은 편차 분포를 나타내며 낮은 예보성능을 보였다.

<표 11> 계절별 최고기온 예보식(II) 검증결과

| 계절 | RMSE | MSE | BIAS | AM | 편차 2℃ 미만 | 편차 4℃ 미만 |
|----|-------|--------|--------|-------|----------|----------|
| 봄 | 3.759 | 14.128 | -0.452 | 2.862 | 46.5% | 75.6% |
| 여름 | 2.386 | 5.695 | -0.298 | 1.935 | 60.7% | 86.9% |
| 가을 | 2.451 | 6.001 | 0.364 | 1.941 | 61.2% | 90.6% |
| 겨울 | 2.687 | 7.218 | -0.074 | 2.081 | 59.6% | 86.5% |

[그림 5]는 최고기온예보에 대한 예측 - 실황값에 대한 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 봄철에 가장 큰 편차를 보이고 있으며 그 외의 계절도 편차가 크다. 봄과 여름은 각각 평균 0.452℃와 0.298℃ 낮게 기온을 예보하고 있으며 반대로 가을철에는 0.364℃ 높게 예보하고 있다.



[그림 5] 최고기온 예보에 대한 계절별 예측 - 실황 편차 분석 결과

최저기온 예보식(II)를 검증한 결과는 <표 12>과 같으며 RMSE가 1.324~2.851℃의 편차를 보이며 최고기온의 경우보다는 조금 더 정확한 결과로 검증되었다. 역시 기온변화가 적은 여름을 가장 정확히 예보하고 있었고 반면 이 예보식은 겨울철의 경우 가장 낮은 적중률을 나타냈다. BIAS는 -0.146~1.187℃의 분포를 보이고 있고 겨울철엔 평균 1.2℃ 정도로 높게 나타나 예보성능을 떨어뜨리고 있다. 반면 여름의 경우에는 0.15℃ 정도 낮게 예상하고 있다. 절대편차평균 값인 AM 값은 0.979~2.423℃로 예측값과 실황과의 실제편차는 여름에는 1℃이내로 가장 작으며, 겨울의 경우 2.4℃내외로 가장 크게 나타났다. 또한 AM(절대편차평균) 값이 2℃ 미만인 경우를 보면 역시 여름이 91.5%로 가장 많으며 겨울의 경우 45.3%로 최고기온과 비교할 때 여름은 편차가 작아져 적중률이 높아졌지만 겨울의 경우에는 편차분포가 무척 커져 적중률이 낮아졌다. 편차 4℃미만의 경우는 여름에는 98.6%로 편차가 가장 작으며, 겨울은 82.8%로 가장 큰 편차분포를 보이고 있다.

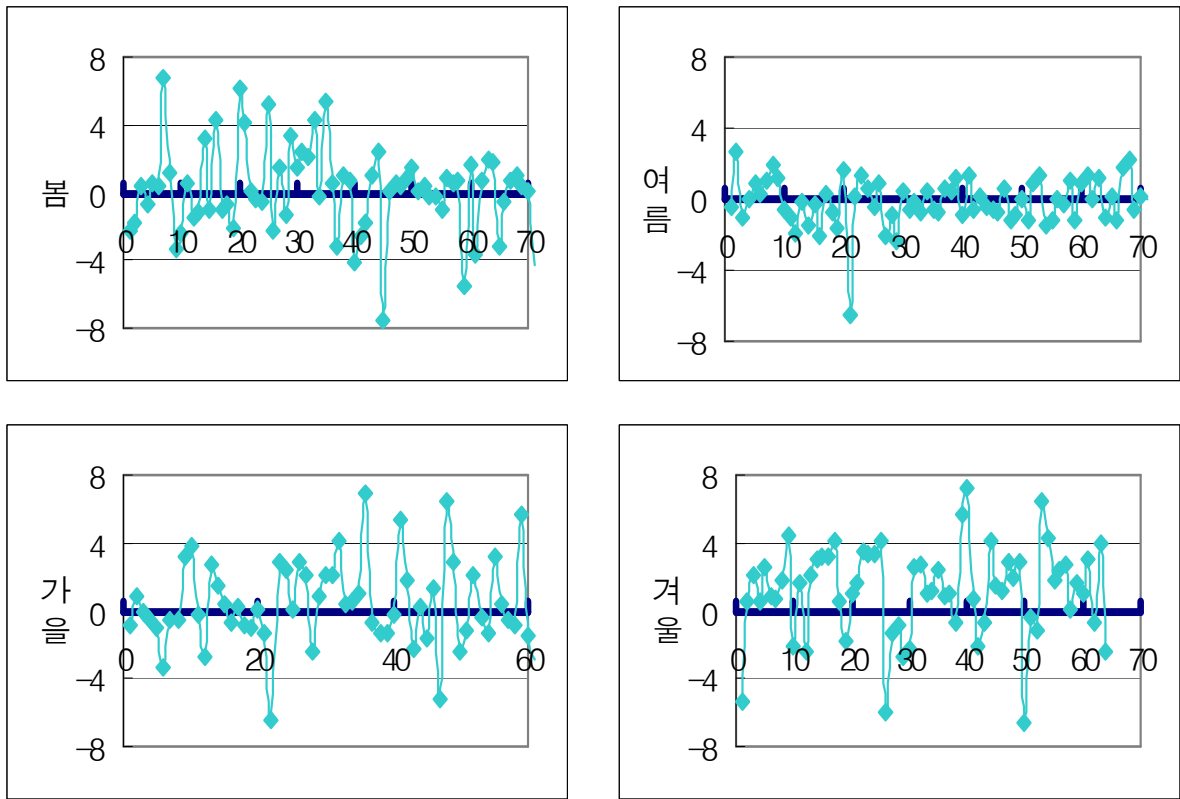
<표 12> 계절별 최저기온 예보식(II) 검증결과

| 계절 | RMSE | MSE | BIAS | AM | 편차 2℃ 미만 | 편차 4℃ 미만 |
|----|-------|-------|--------|-------|----------|----------|
| 봄 | 2.562 | 6.562 | 0.176 | 1.872 | 64.8% | 84.5% |
| 여름 | 1.324 | 1.754 | -0.146 | 0.979 | 91.5% | 98.6% |
| 가을 | 2.549 | 6.498 | 0.397 | 1.908 | 59.0% | 88.5% |
| 겨울 | 2.851 | 8.127 | 1.187 | 2.423 | 45.3% | 82.8% |

[그림 6]는 최저기온예보에 대한 예측 - 실황값에 대한 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 겨울철에 가장 큰 편차를 보이고 있으며 봄과 가을에도 비교적 편차가 크다. 겨울철 예보식은 평균 1.187℃ 높게 기온을 예보하고 있으며 여름의 경우에는 1회를 제외하고는 비교적 정확하게 예보하고 있다.

5) 최고, 최저기온예보식(II) 보완

앞에서 생산한 최고, 최저기온예보식(II)는 12시간 이상 기간 전에 발표되는 예보이므로 단시간 예측인 최고, 최저기온예보식(I)보다는 예보성능이 낮다는 것을 알 수 있다. 이런 낮은 예보성능을 보완하기 위하여 실황과의 절대편차 4℃를 벗어나는 사례에 대한 기압계 유형 및 유형별 기온변화경향을 분석해 보았으며 그 결과는 <표 13 ~ 16>와 같다.



[그림 6] 최저기온 예보에 대한 계절별 예측 - 실황 편차 분석 결과

<표 13>의 최고기온예측치와 실황과의 절대편차 4℃초과되는 사례의 경우가 계절별로는 역시 봄이 많았으며 기압골 통과 직전·후 및 통과시에 가장 많이 발생한 것으로 나타났으며 그 외에는 별 특이한 경우는 보이지 않았다. 다만 여름의 경우 동해안에 고기압이 발생해서 울산공항에 북동류가 유입되는 경우가 4건이 발생했다는 점을 유의 있게 볼 필요가 있겠다.

<표 13> 최고기온예측치와 실황과의 절대편차 4℃초과되는 사례의 기압계 유형

| 계절(건수) | 기압계유형(건수) |
|--------|--|
| 봄(21) | 기압골 통과 전·후 및 통과시(14), 남고북저(2), 동해안고기압, 서고동저, 동고서저, 동해안저기압, 남쪽고기압 |
| 여름(11) | 기압골 통과 전·후 및 통과시(7), 동해안고기압(4) |
| 가을(8) | 기압골 통과 전·후 및 통과시(8) |
| 겨울(12) | 기압골 통과 전·후 및 통과시(9), 동해안 및 북쪽기압골(2), 남서고기압 |

<표 14>에서는 <표 13>에서 조사된 기압계유형별 최고기온 변화경향에 대해 분석한 결과를 나타낸 것이다. 기압계 형태의 주를 차지하는 기압골 통과 전, 후, 통과시 그리고 동해안고기압 발생시에 대해서 집중적으로 조사하였으며 그 결과 계절별로 변화경향에 차이가 있음을 알 수 있었다. 여름을 제외하고 봄, 가을, 겨울철에는 기압골이 통과하기 전과 통과시에는 최고기온예측치보다 다소 상승하는 경향을 보였고 통과후에는 하강경향을 보였다. 반대로 여름철에는 기압골이 통과 전, 후 및 통과할 때 모두 예측치보다 하강하는 경향을 보였으며 동해안에 고기압이 존재하는 경우에도 역시 하강하는 경향을 보였다.

<표 14> 기압계 유형별 최고기온 변화 경향

| 계절 | 기압계 유형별 최고기온 변화 경향 |
|----|--|
| 봄 | 기압골 통과 전(↑6.7℃), 통과시(↑6.9℃), 통과 후(↓5.0℃) |
| 여름 | 기압골 통과 전(↓4.5℃), 통과시(↓5.1℃), 후(↓4.1℃), 동해안고기압(↓4.6℃) |
| 가을 | 기압골 통과 통과시(↑6.2℃) |
| 겨울 | 기압골 통과 전(↑6.3℃), 통과시(↑5.0℃) |

* 괄호 안에 화살표(↑↓) 다음의 수치는 평균적인 기온변화량을 나타낸 것이다.

<표 15>의 최저기온예측치와 실황과의 절대편차 4℃초과되는 사례의 경우 계절별로는 봄과 겨울이 동일하게 11건으로 많았으나 최고기온의 경우보다는 사례수가 적었고 유형도 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 그 중에서도 기압골 통과 직전후 및 통과시에 가장 많이 발생한 것으로 나타났으며 동해안에 고기압 발생시가 그 다음 순으로 나타났다.

<표 15> 최저기온예측치와 실황과의 절대편차 4℃초과되는 사례의 기압계 유형

| 계절(건수) | 기압계유형(건수) |
|--------|--|
| 봄(11) | 기압골 통과 전·후 및 통과시(5), 동해안고기압(2), 남고북저(3), 남쪽저기압 |
| 여름(1) | 기압골 통과 전·후 및 통과시(1) |
| 가을(7) | 동해안고기압(2), 이동성고기압(3), 남고북저, 동쪽저기압 |
| 겨울(11) | 기압골 통과 전·후 및 통과시(7), 북서쪽고기압(2), 동해안저기압, 남고북저 |

<표 16>에서는 <표 15>에서 조사된 기압계유형별 최고기온 변화경향에 대해 분석한 결과를 나타낸 것이다. 최고기압예측치와 마찬가지로 기압계 형태의 주를 차지하는 기압골 통과 전, 후, 통과시 그리고 동해안고기압 발생시에 대해서 조사하였으며 그 결과가 최고기온 예측치의 경우와는 상반되는 경향을 보임을 알 수 있었다. 봄과 겨울철에 기압골이 통과하기 전과 후에는 최저기온예측치보다 다소 하강하는 경향을 보였고 반대로 여름철 기압골 통과 시에는 예측치보다 상승하는 경향을 보였다. 그 외 동해안에 고기압이 존재하는 경우 및 이동성고기압의 경우에는 큰 기온경향을 보이지는 않았다. 다만 특이한 점은 겨울철 북서쪽에 고기압이 존재할 때 기온이 상승하는 경향이 있었다는 점이며 이 유형은 겨울철 북서고기압이 본격적으로 영향을 미치지 않은 경우로 생각된다.

<표 16> 기압계 유형별 최저기온 변화 경향

| 계절 | 기압계 유형별 최저기온 변화 경향 |
|----|--|
| 봄 | 기압골 통과 전(↓6.2℃), 후(↓5.5℃), 동해안고기압(↑0.2℃), |
| 여름 | 기압골 통과 시(↑6.4℃) |
| 가을 | 동해안고기압(↓0.2℃), 이동성고기압(↓1.5℃) |
| 겨울 | 기압골 통과 전(↓5.3℃), 후(↓5.2℃) 및 통과시(↑0.5), 북서쪽고기압(↑6.3℃) |

* 괄호 안에 화살표(↑↓) 다음의 수치는 평균적인 기온변화량을 나타낸 것이다.

3. 결론

객관적이고 효율적인 울산공항의 최고, 최저기온예보법 도출을 위하여 본 과제를 연구수행한 결과 다음과 같이 두 종류의 예보식을 생산하였으며 그 특징을 정리하면 다음과 같다.

가. 최고, 최저기온예보식(I)

최고, 최저기온예보식(I)은 가장 최근의 00과 12UTC 예보인자를 각각 이용하여 예보식을 생산하였으며 때문에 그 정확도는 아주 높은 결과를 나타내었다. 최고, 최저기온 모두 RMSE가 2.2℃이하로 낮으며 그 중에서도 기온변화가 크지 않은 여름의 경우에는 최고, 최저 기온 모두 RMSE가 1.4℃ 및 1.2℃로 아주 나타나 높은 적중률을 나타냈다. 또한 실황과의 절대편차평균을 나타내는 AM의 경우 1℃내외로 아주 정확한 예측을 하고 있다. 최고기온의 경우 실황과의 편차분포가 4℃미만이 사계절 모두 93%이상으로 높으며 여름은 100%를 나타냈다. 기온의 변화가 큰 봄의 경우에는 다른 계절보다는 RMSE, AM 모두 높게 나타나면서 성능이 조금은 낮게 나타났다. 겨울의 경우

최고기온은 비교적 정확하게 예측하고 있으나 최저기온은 최고기온에 비하여 RMSE, AM에서 조금 높은 편차를 보이며 4°C미만 편차가 89.2%로 가장 낮은 성능을 보였다. 최고, 최저기온예보식(I)은 높은 적중률을 나타내고는 있으나 이 예보식은 수치예보된 기상정보를 예보식에 적용하여 기온을 예보해야 하기 때문에 수치예보된 기상정보의 오차에 대한 편차가 추가로 발생하게 되는 한계가 있다.

나. 최고, 최저기온예보식(II)

전일 12 및 21UTC 예보인자를 이용한 최고, 최저기온 예보식(II)은 최고기온의 경우 다소 낮은 예보성능을 나타낸 반면 최저기온의 경우에는 비교적 높은 정확도를 나타냈다. 최고기온의 RMSE가 최고가 3.8°C로 비교적 높으며, 그 중에서도 기온변화가 크지 않은 여름의 경우에는 최고, 최저 기온 모두 RMSE가 2.4°C 및 1.3°C로 비교적 낮으며 최저기온의 경우에는 절대편차평균인 AM이 1°C미만으로 비교적 정확한 예측을 하고 있다. 기온의 변화가 큰 봄의 경우에는 최고기온의 RMSE, AM 모두 편차가 높게 나타나 예보성능이 낮게 나타났으며 실황편차 4°C미만의 경우 75.6%로 가장 편차가 심하게 예측하고 있음을 알 수 있었다.

최고, 최저기온예보식(II)는 이전에 발생한 실황을 예보식에 적용하여 기온을 예보하기 때문에 최고, 최저기온예보식(I)에서 발생하는 문제점인 수치예보된 기상정보의 오차로 인한 편차발생에 대한 문제점을 해결하였다는 장점은 있지만 12시간 이상의 기간 전에 발표되는 예보이므로 단시간 예측인 최고, 최저기온예보식(I)보다는 예보성능이 낮은 단점이 있다. 이런 단점 보완을 위하여 실황과의 절대편차가 4°C를 벗어나는 사례에 대한 기압계 유형을 분석해 보았고 그 결과 <표 14>와 <표 16>과 같이 기압계 유형별 기온변화경향을 파악할 수 있었다. 이 예보식으로 계산된 기온예측값에 특정 기압계 유형에 따른 기온경향을 보완한다면 이 예보식(II)는 더 좋은 효율을 볼 수 있을 것으로 사료된다.

4. 참고문헌

- 수치예보과, 1993: 통계적방법을 이용한 최고 최저 기온예보법, 기상청 수치예보 기술보고서 93-1, 88 pp.
- 항공기상대, 2005: 2005 항공기상 현업연구, 27-47.
- 항공기상대, 2004: 2004 항공기상 현업연구, 43-82.